

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Juraj Ladika**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Student:

Juraj Ladika

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Draženu Lončaru, na pomoći, podršci i razumijevanju tijekom izrade diplomskog rada, te svojoj obitelji i svojim prijateljima na podršci tokom studija.

Juraj Ladika



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## **DIPLOMSKI ZADATAK**

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
1.1. Sustav organskog Rankine-ovog ciklusa (ORC-a) .....	1
2. IZMJENJIVAČ DIMNI PLINOVI/VODA .....	4
2.1. Termodinamički proračun izmjenjivača .....	4
2.1.1. Dimni plinovi .....	4
2.1.2. Voda .....	5
2.1.3. Srednja logaritamska razlika temperatura.....	6
2.1.4. Koeficijent prolaza topline.....	6
2.1.4.1. Koeficijent prijelaza topline na strani vode .....	6
2.1.4.2. Koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova.....	7
2.1.5. Površina izmjene topline i duljina izmjenjivača .....	8
2.2. Dimenzioniranje izmjenjivača .....	9
2.2.1. Izračunavanje promjera plašta .....	9
2.2.2. Cijevni priključci za ulaz i izlaz vode.....	9
2.2.3. Cijevni priključci za ulaz i izlaz dimnih plinova .....	10
2.3. Proračun čvrstoće .....	10
2.4. Tehnički opis izmjenjivača .....	11
2.4.1. Namjena izmjenjivača.....	11
2.4.2. Opis konstrukcije .....	11
2.4.3. Podaci o izmjenjivaču .....	12
2.4.3.1. Osnovne veličine.....	12
2.4.3.2. Materijali.....	12
2.5. Tehnički crteži.....	13
3. PRORAČUN ORC POSTROJENJA.....	14
3.1. Opis rada ORC postrojenja .....	14
3.2. Proračun komponenti ORC postrojenja .....	15
3.2.1. Turbina .....	15
3.2.2. Pumpa .....	17
3.2.3. Isparivač .....	18
3.2.4. Kondenzator .....	21
3.3. Stupanj djelovanja ORC procesa .....	25
3.4. Prikaz ORC procesa u T,s dijagramu .....	25
4. MATEMATIČKI MODEL ORC POSTROJENJA.....	26

4.1. Matematički model izmjenjivača topline dimni plinovi/voda .....	26
4.1.1. Bilanca energije dimnih plinova .....	26
4.1.2. Bilanca energije cijevne stijenke.....	27
4.1.3. Bilanca energije vode.....	28
4.1.4. Dopunske jednadžbe .....	29
4.2. Matematički model isparivača radne tvari .....	29
4.2.1. Bilanca energije vode.....	29
4.2.2. Bilanca energije cijevne stijenke.....	30
4.2.3. Bilanca energije radne tvari .....	31
4.2.4. Dopunske jednadžbe za matematički model isparivača.....	32
4.3. Matematički model kondenzatora radne tvari.....	32
4.3.1. Bilanca energije rashladne vode .....	33
4.3.2. Bilanca energije cijevne stijenke.....	33
4.3.3. Bilanca energije radne tvari .....	34
4.3.4. Dopunske jednadžbe za matematički model kondenzatora .....	35
4.4. Turbina i pumpa .....	36
5. SIMULINK MODELSKA SHEMA ORC POSTROJENJA.....	37
6. REZULTATI SIMULACIJE .....	42
6.1. Porast ulazne temperature dimnih plinova od 100°C.....	42
6.2. Pad ulazne temperature dimnih plinova od 100°C.....	48
6.3. Porast masenog protoka dimnih plinova od 50%.....	53
6.4. Pad masenog protoka dimnih plinova od 50% .....	58
7. ZAKLJUČAK.....	64
LITERATURA.....	65
PRILOZI.....	66

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Shema ORC postrojenja [3] .....	2
Slika 2.	Primarni krug ORC postrojenja [3] .....	3
Slika 3.	Sekundarni krug ORC postrojenja [3] .....	3
Slika 4.	3D model izmjenjivača dimni plinovi/voda .....	13
Slika 5.	Nacrt izmjenjivača u presjeku .....	13
Slika 6.	Komponente jednostavnog ORC postrojenja (lijevo) i ORC proces u T,s dijagramu (desno) [9] .....	14
Slika 7.	T,s dijagram za turbinu [9] .....	15
Slika 8.	T,s dijagram za pumpu [9] .....	17
Slika 9.	Prijelaz topline u isparivaču [9] .....	19
Slika 10.	Prijelaz topline u kondenzatoru [9] .....	22
Slika 11.	T,s dijagram idealnog i realnog ORC procesa [11] .....	25
Slika 12.	Krivulja ovisnosti temperature o entalpiji na tlaku isparavanja [11] .....	32
Slika 13.	Krivulja ovisnosti temperature o entalpiji na tlaku kondenzacije [11] .....	35
Slika 14.	Modelska shema cijelog ORC postrojenja .....	37
Slika 15.	Modelska shema jednog segmenta izmjenjivača topline .....	38
Slika 16.	Modelska shema jednog segmenta isparivača radne tvari .....	39
Slika 17.	Modelska shema turbine ORC postrojenja .....	40
Slika 18.	Modelska shema segmenta kondenzatora radne tvari .....	40
Slika 19.	Modelska shema cirkulacijske pumpe ORC postrojenja .....	41
Slika 20.	Promjena parametara izmjenjivača (poremećaj 1) .....	43
Slika 21.	Promjena parametara isparivača (poremećaj 1) .....	44
Slika 22.	Promjene parametara kondenzatora (poremećaj 1) .....	45
Slika 23.	Promjena snage postrojenja (poremećaj 1) .....	46
Slika 24.	Temperaturna polja (poremećaj 1) .....	47
Slika 25.	Promjena parametara izmjenjivača (poremećaj 2) .....	48
Slika 26.	Promjena parametara isparivača (poremećaj 2) .....	49
Slika 27.	Promjena parametara kondenzatora (poremećaj 2) .....	50
Slika 28.	Promjena snage postrojenja (poremećaj 2) .....	51
Slika 29.	Temperaturna polja (poremećaj 2) .....	52
Slika 30.	Promjena parametara izmjenjivača (poremećaj 3) .....	53
Slika 31.	Promjena parametara isparivača (poremećaj 3) .....	54
Slika 32.	Promjena parametara kondenzatora (poremećaj 3) .....	55
Slika 33.	Promjena snage postrojenja (poremećaj 3) .....	56
Slika 34.	Temperaturna polja (poremećaj 3) .....	57
Slika 35.	Promjena parametara izmjenjivača (poremećaj 4) .....	58
Slika 36.	Promjena parametara isparivača (poremećaj 4) .....	59
Slika 37.	Promjena parametara kondenzatora (poremećaj 4) .....	60
Slika 38.	Promjena snage postrojenja (poremećaj 4) .....	61
Slika 39.	Temperaturna polja (poremećaj 4) .....	62

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Sastav bioplina [4].....	4
Tablica 2. Sastav dimnih plinova .....	5
Tablica 3. Vrijednosti parametara turbine .....	16
Tablica 4. Vrijednosti parametara pumpe .....	18
Tablica 5. Vrijednosti parametara isparivača .....	21
Tablica 6. Vrijednosti parametara kondenzatora.....	24



## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- 1 Sklopni crtež izmjenjivača
- 2 Cijevna stijenka
- 3 Lijeva podnica
- 4 Desna podnica
- 5 Lijeva brtva
- 6 Desna brtva

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\Phi_{iz}$	kW	Toplinska snaga izmjenjivača
$d_v$	mm	Vanjski promjer cijevi izmjenjivača
$d_u$	mm	Unutrašnji promjer cijevi izmjenjivača
$T_{dp,u}$	°C	Temperatura dimnih plinova na ulazu u izmjenjivač
$T_{dp,i}$	°C	Temperatura dimnih plinova na izlazu iz izmjenjivača
$m_{dp}$	kg/s	Maseni protok dimnih plinova
$c_{dp}$	kJ/(kgK)	Specifični toplinski kapacitet dimnih plinova
$T_{w,u}$	°C	Temperatura vode na ulazu u izmjenjivač
$T_{w,i}$	°C	Temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača
$m_w$	kg/s	Maseni protok vode
$c_w$	kJ/(kgK)	Specifični toplinski kapacitet vode
$w_w$	m/s	Brzina strujanja vode kroz izmjenjivač
$N$	-	Broj cijevi u jednom prolazu
$\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća vode
$\Delta T_m$	°C	Srednja logaritamska razlika temperatura
$\alpha_w$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prijelaza topline na strani vode
$\alpha_{dp}$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova
$k$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prolaza topline
$A$	m <sup>2</sup>	Površina izmjene topline izmjenjivača
$\lambda_{st}$	W/(mK)	Toplinska provodljivost stijenke
$Re$	-	Reynoldsov broj
$Pr$	-	Prandtlov broj
$\eta_w$	Pas	Dinamička viskoznost vode
$\lambda_w$	W/(mK)	Toplinska provodljivost vode
$Nu$	-	Nusseltov broj
$w_{dp}$	m/s	Brzina strujanja dimnih plinova kroz izmjenjivač
$\rho_{dp}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća dimnih plinova
$\eta_{dp}$	Pas	Dinamička viskoznost dimnih plinova
$\lambda_{dp}$	W/(mK)	Toplinska provodljivost dimnih plinova
$C$	-	Koeficijent neobrađivanog plašta
$f_q$	-	Koeficijent smjera izmjene topline
$L$	m	Duljina izmjenjivača (1 prolaz)
$L_{iz}$	m	Duljina izmjenjivača (4 prolaz)
$N_{uk}$	-	Ukupan broj cijevi
$t$	mm	Razmak između cijevi

$D_v$	mm	Vanjski promjer plašta
$D_u$	mm	Unutrašnji promjer plašta
$s$	mm	Debljina stijenke plašta
$d_{wv}$	mm	Vanjski promjer priključka za vodu
$d_{wu}$	mm	Unutrašnji promjer priključka za vodu
$s_w$	mm	Debljina stijenke priključka za vodu
$d_{pv}$	mm	Vanjski promjer priključka za dimne plinove
$d_{pu}$	mm	Unutrašnji promjer priključka za dimne plinove
$s_p$	mm	Debljina stijenke priključka za dimne plinove
$T_{1-4}$	°C	Temperature radne tvari u točkama procesa
$x$	kg/kg	Sadržaj pare
$p_k$	bar	Tlak kondenzacije
$p_i$	bar	Tlak isparavanja
$h_{1-4}$	kJ/kg	Entalpija radne tvari u točkama procesa
$P_T$	kW	Snaga turbine
$m_{rt}$	kg/s	Maseni protok radne tvari
$\eta_T$	%	Izentropska iskoristivost turbine
$\eta_p$	%	Izentropska iskoristivost pumpe
$P_P$	kW	Snaga pumpe
$\Phi_{isp}$	kW	Toplinska snaga isparivača
$T_{w,u,isp}$	°C	Temperatura vode na ulazu u isparivač
$T_{w,i,isp}$	°C	Temperatura vode na izlazu iz isparivača
$k_{isp}$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prolaza topline u isparivaču
$A_{isp}$	m <sup>2</sup>	Površina izmjene topline isparivača
$h_{rt,i,isp}$	kJ/kg	Entalpija radne tvari na izlasku iz isparivača
$h_{rt,u,isp}$	kJ/kg	Entalpija radne tvari na ulasku u isparivač
$\alpha_{pred}$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari u predgrijaču isparivača
$\alpha_{isp}$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari u isparivačkom dijelu isparivača
$\Delta T_{m,isp}$	°C	Srednja logaritamska razlika temperatura u isparivaču
$\Phi_{kond}$	kW	Toplinska snaga kondenzatora
$T_{w,u,kond}$	°C	Temperatura rashladne vode na ulazu u kondenzator
$T_{w,i,kond}$	°C	Temperatura rashladne vode na izlazu iz kondenzatora
$k_{kond}$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prolaza topline u kondenzatoru
$A_{kond}$	m <sup>2</sup>	Površina izmjene topline kondenzatora
$h_{rt,i,kond}$	kJ/kg	Entalpija radne tvari na izlasku iz kondenzatora
$h_{rt,u,kond}$	kJ/kg	Entalpija radne tvari na ulasku u kondenzator
$\alpha_{hl}$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari u hladnjaku kondenzatora
$\alpha_{kond}$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova u kondenzacijskom dijelu kondenzatora

---

$\Delta T_{m,kond}$	$^{\circ}\text{C}$	Srednja logaritamska razlika temperatura u kondenzatoru
$\eta_{ORC}$	%	Stupanj djelovanja ORC procesa
$M_{dp}$	kg	Masa dimnih
$M_{st}$	kg	Masa stijenke cijevi
$c_{st}$	$\text{kJ}/(\text{kgK})$	Specifični toplinski kapacitet stijenke cijevi
$T_{st}$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura stijenke
$M_w$	kg	Masa vode
$M_{rt}$	kg	Masa radne tvari
$\alpha_{rt}$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari
$A_{rt}$	$\text{m}^2$	Površina izmjene topline na strani radne tvari
$A_w$	$\text{m}^2$	Površina izmjene topline na strani vode
$A_{dp}$	$\text{m}^2$	Površina izmjene topline na strani dimnih plinova
$h_{rt}$	$\text{kJ}/\text{kg}$	Entalpija radne tvari

## **SAŽETAK**

U radu su prikazana opća svojstva i rad postrojenja s organskim Rankine-ovim ciklusom (ORC). Definirana konfiguracija i prikazan proračun elemenata ORC postrojenja snage 125 kW. Proračunat je i nacrtan izmjenjivač topline dimni plinovi/voda zadane toplinske snage 1000 kW koji služi za iskorištavanje otpadne topline iz bioplinskog postrojenja. Postavljen je matematički model dinamike procesa u komponentama sustava. Za kraj je provedene simulacije utjecaja promjenjivog protoka i temperature ispušnih plinova na pogonske značajke ORC postrojenja i analizirani su dobiveni rezultati.

Ključne riječi: ORC, organski Rankine-ov ciklus, izmjenjivač topline, isparivač, kondenzator, dinamika procesa, termodinamika

## **SUMMARY**

Thesis presents general properties and operating principle of an Organic Rankine cycle (ORC) plant. Configuration is defined and thermodynamic calculations are made for 125 kW ORC plant. A 1000 kW flue gas/water heat exchanger intended for utilization of biogas plant waste heat is calculated and designed. A mathematical model of the dynamic process within the elements of the ORC plant is defined. Simulation of the effect of a change in the temperature and mass flow of flue gas on the operational characteristics of the ORC plant is carried out and the results of the simulation are analysed.

Key words: ORC, organic Rankine cycle, heat exchanger, evaporator, condenser, process dynamics, thermodynamics

## 1. UVOD

U proteklom stoljeću došlo je do naglog ekonomskog razvoja mnogih dijelova svijeta. Taj je razvoj sa sobom donio porast životnog standarda, porasta broja stanovnika, ali i također do značajnog porasta potrebe za energijom. Taj nagli porast potrebe za energijom se u većini slučajeva podmirivao fosilnim gorivima, što je i razlog naglog povećanja udjela stakleničkih plinova u atmosferi. Dvije trećine emisija stakleničkih plinova dolazi iz deset najindustrijaliziranijih zemalja svijeta, a veliki porast emisija se može očekivati kada se ubrza razvoj manje industrijaliziranih zemalja. Zbog izravne veze između ekonomskog rasta i potrošnje resursa, sve važniji postaje razvoj tehnologija koje bi omogućile što učinkovitiju potrošnju energije. [1]

Usprkos razvoju obnovljivih izvora energije i ostalih „čistih“ tehnologija, fosilna goriva su još uvijek dominantan izvor energije. Upotreba fosilnih goriva ne samo da je glavni izvor antropogenog CO<sub>2</sub>, već su fosilna goriva neobnovljivi izvor energije, što znači da postoji ograničena količina fosilnih goriva, te je stoga potrebno pronaći čim isplative alternativne metode proizvodnje energije. Kako zadovoljavajuća alternativa fosilnim gorivima još nije otkrivena, druga opcija je nastojati čim efikasnije koristiti fosilna goriva kako bi smanjili njihovu sveukupnu potrošnju. Jedan od načina na koji se to može postići je iskorištavanje otpadne topline, što je začetak teme ovog rada.

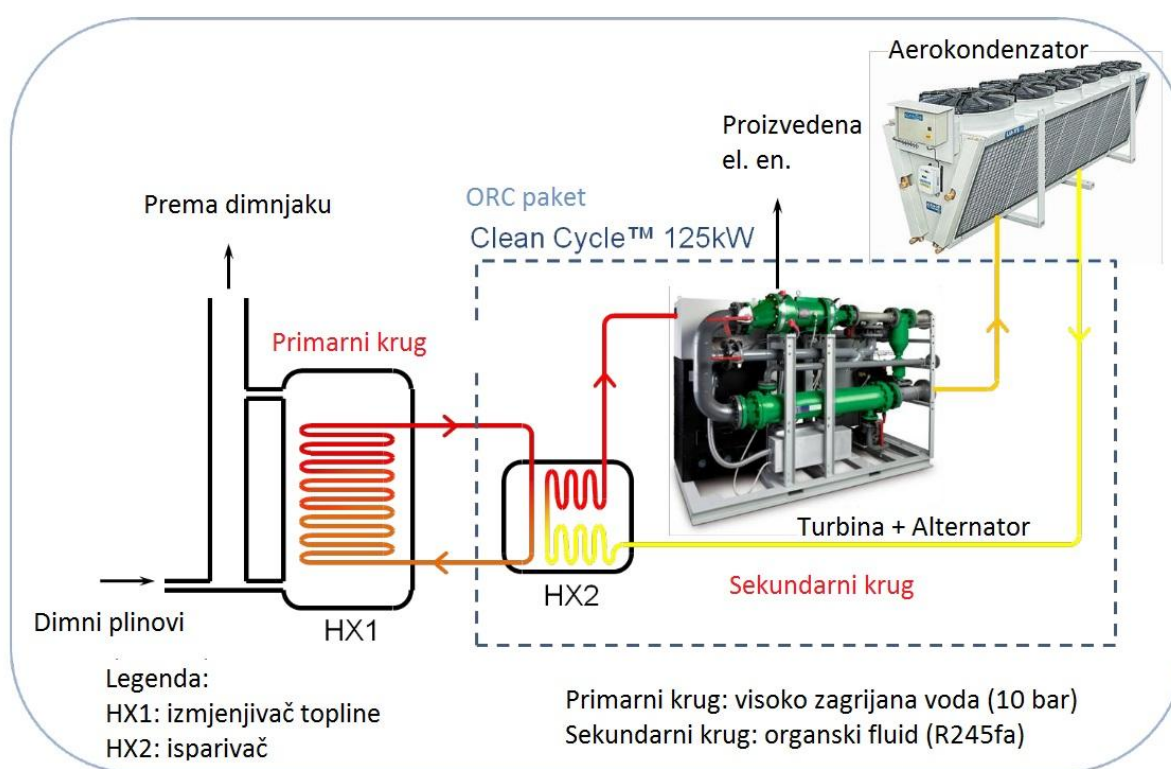
### 1.1. Sustav organskog Rankine-ovog ciklusa (ORC-a)

ORC jest varijacija Rankine-ovog ciklusa. Sam sustav se sastoji od istih elemenata i radna tvar sustava prolazi kroz iste promjene stanja. Ono što ORC čini posebnim jest izbor radne tvar. Naime, kako samo ime govori u ORC-u se koristi organski fluid kao radna tvar (silikonsko ulje, izopentan, izooktan, amonijak,...). Posebnost organske radne tvari jest to da isparava na znatno nižim temperaturama od vode, što joj omogućava da iskoristi toplinu znatno nižih temperatura. Ovaj se proces najviše primjenjuje u geotermalnoj proizvodnji električne energije, teškoj industriji gdje se iskorištava otpadna toplina, a sve se više primjenjuje i korištenje sunčeve energije i biomase. [2]

Kao ogrjevnii medij može se koristiti voda ili termo ulje, temperature u rasponu od 250°C do 300°C. Ogrjevnii medij predaje toplinu radnoj tvari u isparivaču koja zatim ekspandira u turbini. Zbog relativno male brzine vrtnje turbine može se spojiti izravno na generator, što

smanjuje energetske gubitke. Ekspanzijom radne tvari u turbini smanjuje se energetska razina pare radne tvari i generira se mehanički rad. Nakon turbine radna tvar kondenzira u kondenzatoru gdje može dalje predavati toplinu u sustav kao što je npr. područno grijanje. Ohlađeni radni medij pumpa vraća natrag u isparivač. Sustav može sadržavati regenerator u kojem se dio topline radne tvari prije ulaska u kondenzator prenosi na radnu tvar prije ulaska u isparivač. [2]

Tekst ovog zadatka temelji se na primjeru stvarnog ORC postrojenja na otpadnu toplinu iz bioplinskog postrojenja.



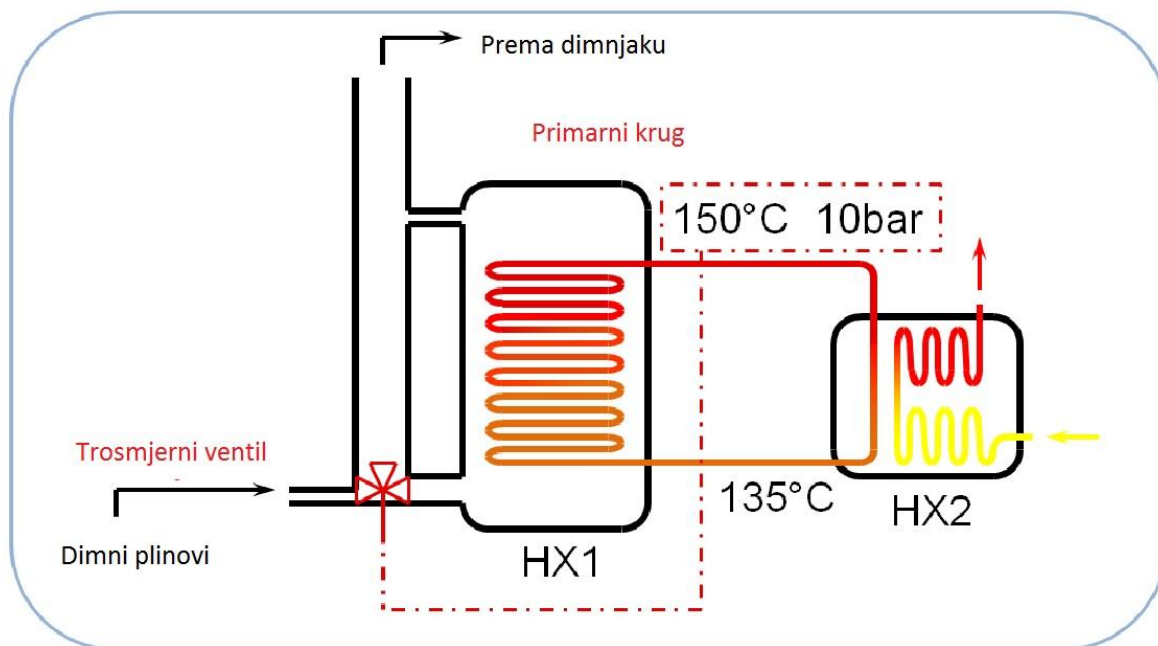
**Slika 1. Shema ORC postrojenja [3]**

Iz [Slika 1.] je vidljivo da se sustav sastoji od dva kruga, kruga vode i kruga organskog medija. U ovom slučaju voda služi kao ogrjevnj medij i dobiva toplinu iz ispušnih plinova bioplinskog postrojenja, te time povećava iskoristivost potrošnje energije. Voda u isparivaču predaje primljenu toplinu radnoj tvari koja zatim slijedi prethodno opisani proces.

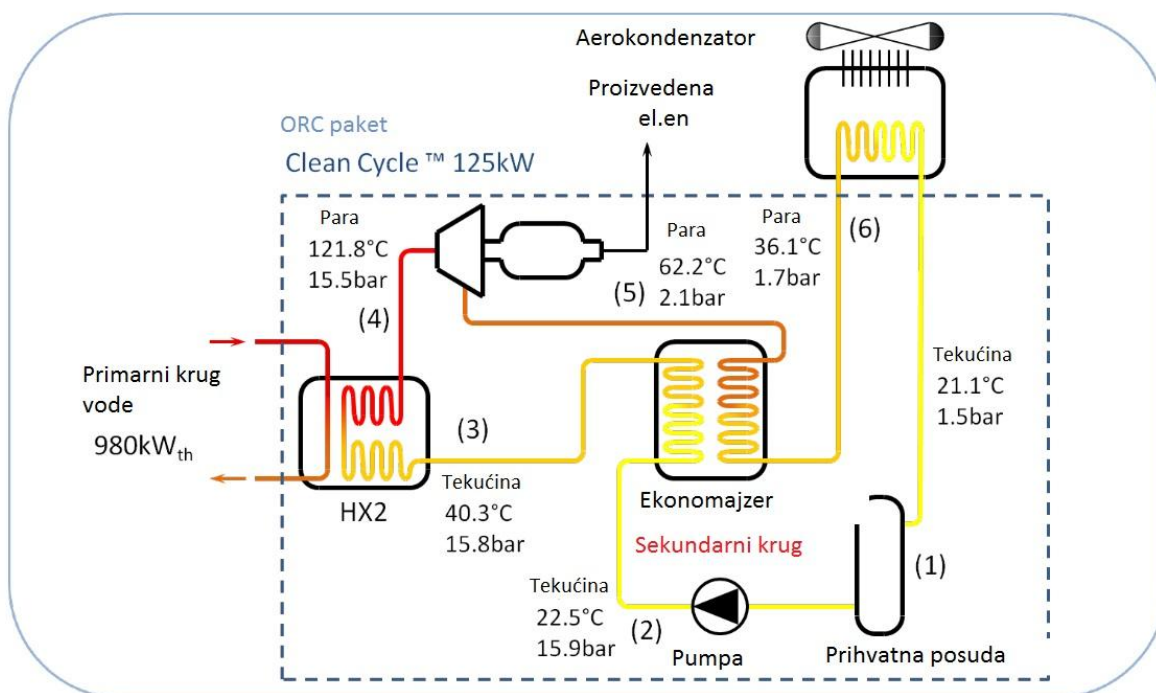
U sklopu ovog rada biti će potrebno proračunati i nacrtati izmjenjivač topline dimni plinovi/voda toplinske snage 1000 kW, definirati konfiguraciju i provesti termodinamički proračun komponenata sustava snage 125 kW, postaviti matematički model dinamike procesa



u komponentama sustava, te simulirati utjecaj promjenjivog protoka i temperature ispušnih plinova bioplinskog motora na pogonske značajke ORC postrojenja.



**Slika 2. Primarni krug ORC postrojenja [3]**



**Slika 3. Sekundarni krug ORC postrojenja [3]**

Iako se zadatak ovog rada zasniva na ovom primjeru, unutar samog rada će se postaviti određene pretpostavke kako bi pojednostavili postrojenje koje je potrebno proračunati i simulirati.

## 2. IZMJENJIVAČ DIMNI PLINOVI/VODA

S obzirom da je tematika ovog rada simulacija pogona ORC postrojenja namijenjenog iskorištavanju otpadne topline nastale radom bioplinskog postrojenja, u sklopu rada bilo je potrebno proračunati i nacrtati izmjenjivač topline čija je namjena zagrijavanje struje vode koja služi kao ogrjevni medij ORC postrojenja. U tekstu zadatka definirana je nazivna toplinska snaga izmjenjivača od  $\Phi_{iz} = 1000$  kW. Izmjenjivač je tipa *Shell&Tube* s istosmjernim strujanjem fluida, gdje voda struji kroz cijevi dok dimni plinovi struje oko cijevi. Cijevi kroz koje struji voda su bakrene cijevi dimenzija  $d_v = 20$  mm i  $d_u = 18$  mm.

### 2.1. Termodinamički proračun izmjenjivača

Unutar izmjenjivača, izmjena topline se vrši između dvije struje fluida. Struja dimnih plinova iz bioplinskog postrojenja predaje toplinu struji vode. Kako bi se odredile osnovne dimenzije izmjenjivača potrebno je provesti termodinamički proračun na temelju toplinskih svojstava struja fluida. Korištena će biti metoda temeljena na srednjoj logaritamskoj razlici temperatura uz sljedeće pretpostavke:

- Nema izmjene topline s okolinom.
- Nema uzdužnog provođenja topline u smjeru strujanja.
- Stacionarno stanje, nema akumulacije energije unutar stijenke.

#### 2.1.1. Dimni plinovi

Dimni plinovi na izlazu iz bioplinskog postrojenja imaju temperaturu od  $T_{dp,u} = 450^\circ\text{C}$ . Kako bi se mogla odrediti svojstva dimnih plinova potrebno je poznavati njihov sastav. Sastav dimnih plinova izračunat je preko izgaranja bioplina poznatog sastava [Tablica 1.].

**Tablica 1. Sastav bioplina [4]**

Sastojak	Kemijska oznaka	Udio (vol.-%)
Metan	CH <sub>4</sub>	62,5%
Ugljikov dioksid	CO <sub>2</sub>	35%
Dušik	N <sub>2</sub>	1,5%
Kisik	O <sub>2</sub>	1%

Pošto je poznat sastav goriva moguće je odrediti svojstva bioplina te na temelju njih izračunati sastav dimnih plinova [Tablica 2.].

**Tablica 2. Sastav dimnih plinova**

Sastojak	Kemijska oznaka	Udio (vol.-%)
Ugljikov dioksid	CO <sub>2</sub>	14%
Dušik	N <sub>2</sub>	18%
Voda	H <sub>2</sub> O	68%

Prema sastavu dimnih plinova moguće je odrediti toplinska svojstva potrebna za provođenje termodinamičkog proračuna. Na izlazu struje dimnih plinova iz izmjenjivača odabrana je temperatura od  $T_{dp,i} = 250^{\circ}\text{C}$ . S obzirom da su poznata toplinska svojstva dimnih plinova, promjena temperature i potrebna toplinska snaga izmjenjivača, moguće je odrediti potrebni maseni protok dimnih plinova kroz izmjenjivač  $q_{m,dp}$ .

$$m_{dp} = \frac{\phi_{iz}}{c_{dp}(T_{dp,u} - T_{dp,i})} = 4,193 \text{ kg/s} \quad (1)$$

### 2.1.2. Voda

Na ulazu struje vode u izmjenjivač odabrana je temperatura od  $T_{w,u} = 135^{\circ}\text{C}$ . Kako bi se izbjegla promjena agregatnog stanja, struja vode se nalazi na tlaku od 10 bar. Temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača je  $T_{w,i} = 150^{\circ}\text{C}$ . Toplinska svojstva vode se uzimaju za srednju temperaturu vode između ulaza i izlaza iz izmjenjivača. Kao i u slučaju dimnih plinova, na temelju dobivenih podataka određuje se maseni protok struje vode kroz izmjenjivač  $q_{m,w}$ .

$$m_w = \frac{\phi_{iz}}{c_w(T_{w,u} - T_{w,i})} = 15,552 \text{ kg/s} \quad (2)$$

Na temelju izračunatog masenog protoka moguće je izračunati potreban broj cijevi unutar izmjenjivača  $N$ . Odabrana je brzina strujanja vode kroz izmjenjivač  $w_w = 1 \text{ m/s}$ .

$$N = \frac{4m_w}{w_w d_u^2 \pi \rho_w} \approx 65 \quad (3)$$

### 2.1.3. Srednja logaritamska razlika temperatura

Preko poznatih temperatura ulaza i izlaza struja fluida iz izmjenjivača izračunava se srednja logaritamska razlika temperatura  $\Delta T_m$ .

$$\Delta T_m = \frac{(T_{dp,u} - T_{w,u}) - (T_{dp,i} - T_{w,i})}{\ln \frac{T_{dp,u} - T_{w,u}}{T_{dp,i} - T_{w,i}}} = 187,38 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

### 2.1.4. Koeficijent prolaza topline

Za izračunavanje koeficijenta prolaza topline  $k$  potrebno je odrediti koeficijente prijelaza topline na strani vode  $\alpha_w$  i na strani dimnih plinova  $\alpha_{dp}$ . Koeficijent prolaza topline će se odrediti za vanjsku površinu cijevi izmjenjivača topline.

$$k = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \alpha_w} + \frac{d_v}{2\lambda_{st}} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_{dp}}} = 137,06 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (5)$$

#### 2.1.4.1. Koeficijent prijelaza topline na strani vode

Prilikom izračunavanja koeficijenta prijelaza topline na strani vode koriste se toplinska svojstva vode za srednju temperaturu vode između izlaza i ulaza u kondenzator. Na temelju tih toplinskih svojstava određuju se Reynoldsov  $Re$  i Prandtlov broj  $Pr$ .

$$Re = \frac{w_w d_u \rho_w}{\eta_w} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\eta_w c_w}{\lambda_w} \quad (7)$$

Dobivene vrijednosti se uvrštavanju u izraz za Nusseltov broj  $Nu$  za turbulentno strujanje kroz cijev. [5]

$$Nu = \frac{0.0398 \cdot Pr \cdot Re^{0.75}}{1 + 1.74 \cdot Re^{-0.125} \cdot (Pr - 1)} \quad (8)$$

Preko dobivene vrijednosti se izračunava iznos koeficijenta prijelaza topline na strani vode  $\alpha_w$ .

$$\alpha_w = \frac{Nu \lambda_w}{d_u} \quad (9)$$

#### 2.1.4.2. Koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

Kao i kod vode, toplinska svojstva se uzimaju za srednju temperaturu dimnih plinova između ulaza i izlaza iz kondenzatora. Izrazi za Reynoldsov i Prandtlov broj su isti kao i u prethodnom slučaju.

$$Re = \frac{w_{dp} d \rho_{dp}}{\eta_{dp}} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{\eta_{dp} c_{dp}}{\lambda_{dp}} \quad (11)$$

Nusseltov broj se izračunava preko dobivenih vrijednosti, koeficijenta neobrađivanog plašta  $C$  i korekcijskog faktora za smjer izmjene topline  $f_q$ . [5]

$$Nu = C \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.33} \cdot f_q \quad (12)$$

Preko dobivene vrijednosti se izračunava iznos koeficijenta prijelaza topline na strani dimnih plinova  $\alpha_{dp}$ .

$$\alpha_{dp} = \frac{Nu\lambda_{dp}}{d} \quad (13)$$

### 2.1.5. Površina izmjene topline i duljina izmjenjivača

Nakon što se dobiju vrijednosti koeficijenta prolaza topline i srednje logaritamske razlike temperature može se izračunati potrebna površina izmjene topline na strani dimnih plinova A.

$$A = \frac{\phi_{iz}}{k\Delta T_m} = 38,94 \text{ m}^2 \quad (14)$$

Preko dobivene površine A i broja cijevi N se izračunava duljina izmjenjivača topline L.

$$L = \frac{A}{d_v \pi N} = 9,534 \text{ m} \quad (15)$$

Pošto je dobivena duljina izmjenjivača prevelika u usporedbi s time koliki bi bio promjer plašta s 65 cijevi u sebi, odabrati će se 4 prolaza vode kroz izmjenjivač, te je tada duljina izmjenjivača:

$$L_{iz} = \frac{L}{4} = 2,383 \text{ m} \approx 2,4 \text{ m} \quad (16)$$

Što znači da je ukupan broj cijevi u izmjenjivaču  $N_{uk} = 260$ .

## 2.2. Dimenzioniranje izmjenjivača

Potrebno je dimenzionirati pojedine elemente geometrije izmjenjivača da bi se omogućilo uspješno konstruiranje izmjenjivača. Poznata je potrebna duljina cijevi i broj cijevi, te brzine strujanja fluida kroz izmjenjivač. Na temelju tih podataka se može definirati konačna geometrija izmjenjivača.

### 2.2.1. Izračunavanje promjera plašta

$$D_H = \sqrt{f_1 \cdot N_{uk} \cdot t^2 + f_2 \cdot \sqrt{N_{uk}} \cdot t} + d_v = 476 \text{ mm} \quad (17)$$

Plašt izmjenjivača izradit će se od čelične bešavne cijevi DN500: [6]

- $D_v = 508 \text{ mm}$
- $D_u = 486 \text{ mm}$
- $s = 11 \text{ mm}$  - debljina stijenke

### 2.2.2. Cijevni priključci za ulaz i izlaz vode

$$d_{wu} = \sqrt{\frac{4m_w}{\pi \rho_w w_w}} = 0.066 \text{ m} \quad (18)$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN 65

- $d_{wv} = 76.1 \text{ mm}$
- $d_{wu} = 70.3 \text{ mm}$
- $s_w = 2.9 \text{ mm}$

Odabirem i prirubnicu s grlom za zavarivanje DN 65 (DIN 2633 PN 16) [7]

### 2.2.3. Cijevni priključci za ulaz i izlaz dimnih plinova

$$d_{dpu} = \sqrt{\frac{4m_{dp}}{\pi\rho_{dp}w_{dp}}} = 0.302 \text{ m} \quad (19)$$

Odabrana čelična bešavna cijev DN 300

- $d_{dpv} = 323,9 \text{ mm}$
- $d_{dpu} = 309,7 \text{ mm}$
- $s_{dp} = 7,1 \text{ mm}$

Odabirem i prirubnicu s grlom za zavarivanje DN 300 (DIN 2633 PN 16) [7]

### 2.3. Proračun čvrstoće

Za odabrane elemente konstrukcije izmjenjivača je proveden proračun čvrstoće prema normama za aparate i posude pod tlakom, te se pokazalo da su odabrani elementi odgovaraju zahtjevima za sigurnost. [8]



## **2.4. Tehnički opis izmjenjivača**

### **2.4.1. Namjena izmjenjivača**

Izmjenjivač je namijenjen iskorištavanju otpadne topline iz bioplinskog postrojenja. U izmjenjivaču se toplina koristi za zagrijavanje vode koja funkcionira kao ogrjevnj medij ORC postrojenja.

### **2.4.2. Opis konstrukcije**

Izmjenjivač je tipa *Shell&Tube*, zavarene izvedbe, postavljen horizontalno u prostoru. U cijevima isparivača kao struji voda koja se pri tome zagrijava s 135 °C na 150 °C. Ispušni plinovi bioplinskog postrojenja struje oko cijevi te s ulaznom temperaturom do 450°C. Toplinska snaga izmjenjivača je 1000 kW.

Konstrukcija kondenzatora sadrži:

- dvije cijevne stijenke debljine 30 mm
- plašt izmjenjivača – bešavna cijev  $d_v=508$  mm
- cijevni priključak s odgovarajućom prirubnicom za ulaz vode
- cijevni priključak s odgovarajućom prirubnicom za izlaz vode
- cijevni priključak s odgovarajućom prirubnicom za ulaz dimnih plinova
- cijevni priključak s odgovarajućom prirubnicom za izlaz dimnih plinova
- cijevi za prolaz vode – 260 komada
- podnice – 2 komada; jedna s provrtom za ulaz i izlaz vode, druga puna
- brtve – 2 komada
- nosivi element – 2 komada
- pregradbeni lim – 3 komada
- segmentne pregrade – 7 komada

### **2.4.3. Podaci o izmjenjivaču**

#### **2.4.3.1. Osnovne veličine**

- unutarnji promjer plašta 486 mm
- debljina stijenke plašta 11 mm
- dužina od ulazne do izlazne cijevne stijenke 2400 mm
- broj cijevi 260
- dimenzije cijevi Ø20x1 mm
- veličina prirubnice za dimne plinove DN 300 PN16
- veličina prirubnica za vodu DN 65 PN 16
- proračunski tlak 10 bar

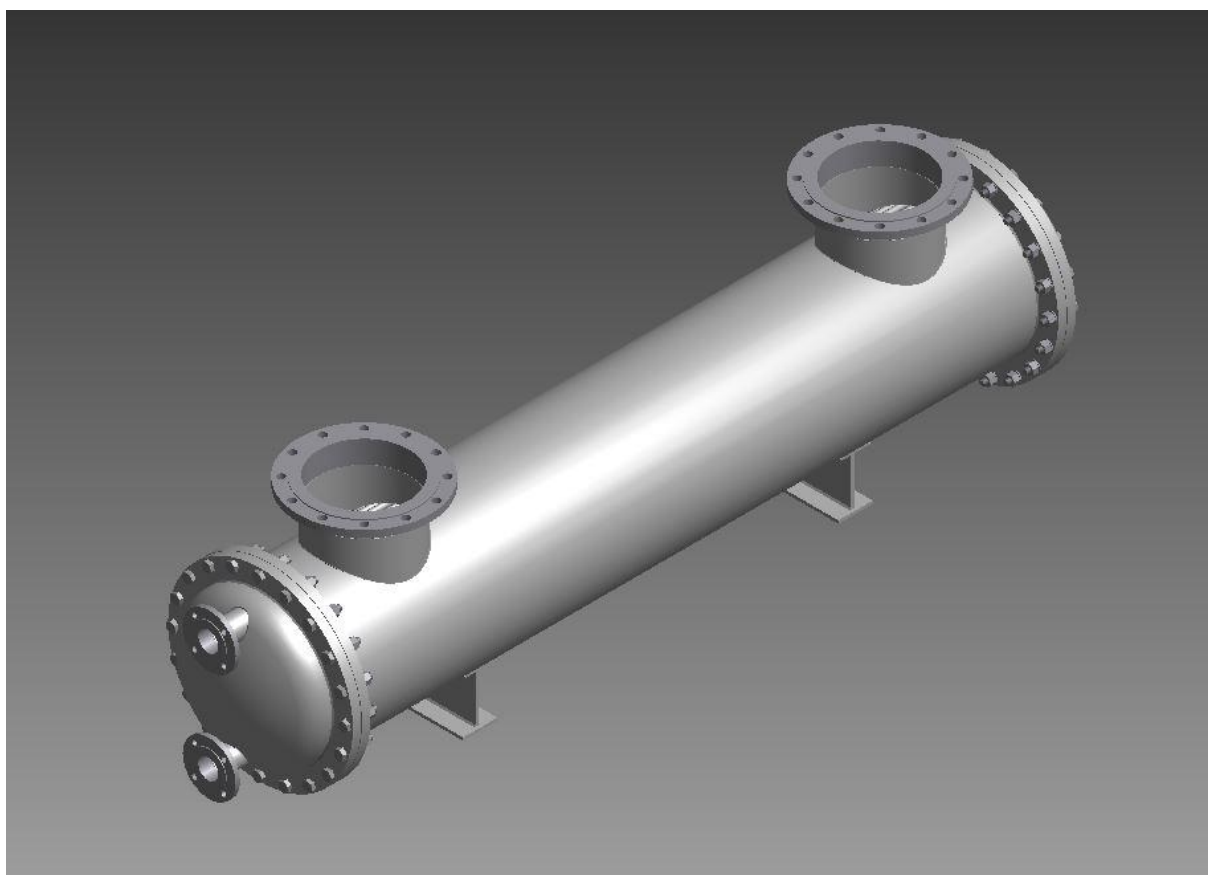
#### **2.4.3.2. Materijali**

Dijelovi izmjenjivača izrađeni su od materijala kako slijedi:

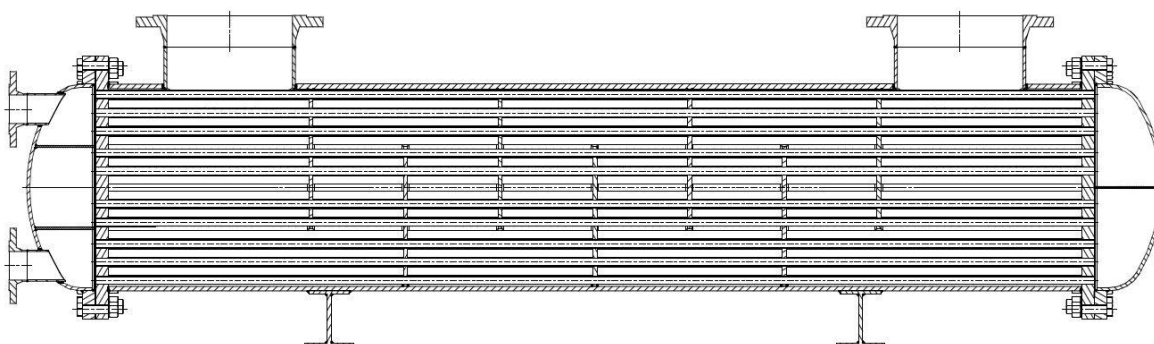
- plašt – Č. 1212
- podnice – Č. 0361
- cijevne stijenke – Č. 0361
- prirubnice – Č. 0361
- cijevni nastavci - Č. 0361
- pregradbeni limovi - Č. 0361
- segmentne pregrade - Č. 0361
- nosivi element - Č. 0545
- brtve – klingerit

## 2.5. Tehnički crteži

U sklopu rada priložena je tehnička dokumentacija proračunatog izmjenjivača topline. Ovdje će biti dan samo primjer 3D modela izmjenjivača [Slika 4.] i nacrt izmjenjivača u presjeku [Slika 5.].



**Slika 4.** 3D model izmjenjivača dimni plinovi/voda

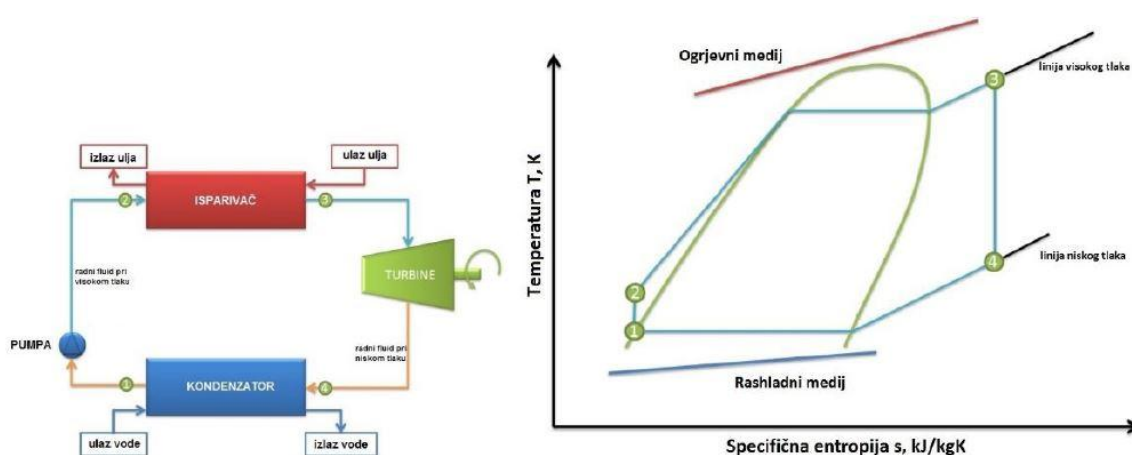


**Slika 5.** Nacrt izmjenjivača u presjeku

### 3. PRORAČUN ORC POSTROJENJA

### 3.1. Opis rada ORC postrojenja

Princip rada ORC postrojenja jednak je principu rada svakog vodeno-parnog ciklusa. Na [Slika 6.] se mogu vidjeti osnovne komponente sustava i prikaz procesa u T,s dijagramu.



**Slika 6. Komponente jednostavnog ORC postrojenja (lijevo) i ORC proces u T,s dijagramu (desno) [9]**

U točki 1 nalazi se vrela ili pothlađena kapljevina radne tvari temperature  $T_1$  na tlaku kondenzacije  $p_k$ , koja nakon toga ulazi u cirkulacijsku pumpu i diže se na tlak isparavanja  $p_i$  i temperaturu  $T_2$ . Nakon cirkulacijske pumpe radna tvar ulazi u isparivač gdje se odvijaju tri procesa: zagrijavanje do temperature zasićenja  $T_2'$  na liniji  $x = 0$ , isparavanja kapljevine pri konstantnoj temperaturi do linije zasićenja  $x = 1$  i pregrijavanja pare do temperature  $T_3$ . Nakon izlaska iz isparivača radna tvar ulazi u turbinu i ekspandira na tlak kondenzacije  $p_k$  i temperaturu  $T_4$ . Nakon ekspanzije u turbini radna tvar ulazi u kondenzator gdje se, u ovom slučaju, odvijaju dva procesa: hlađenje do temperature  $T_4'$  na liniji zasićenja  $x = 1$  i kondenzacije pare radne tvari pri konstantnoj temperaturi do linije zasićenja  $x = 0$ . Nakon kondenzacije radna tvar se vraća u početnu točku 1.

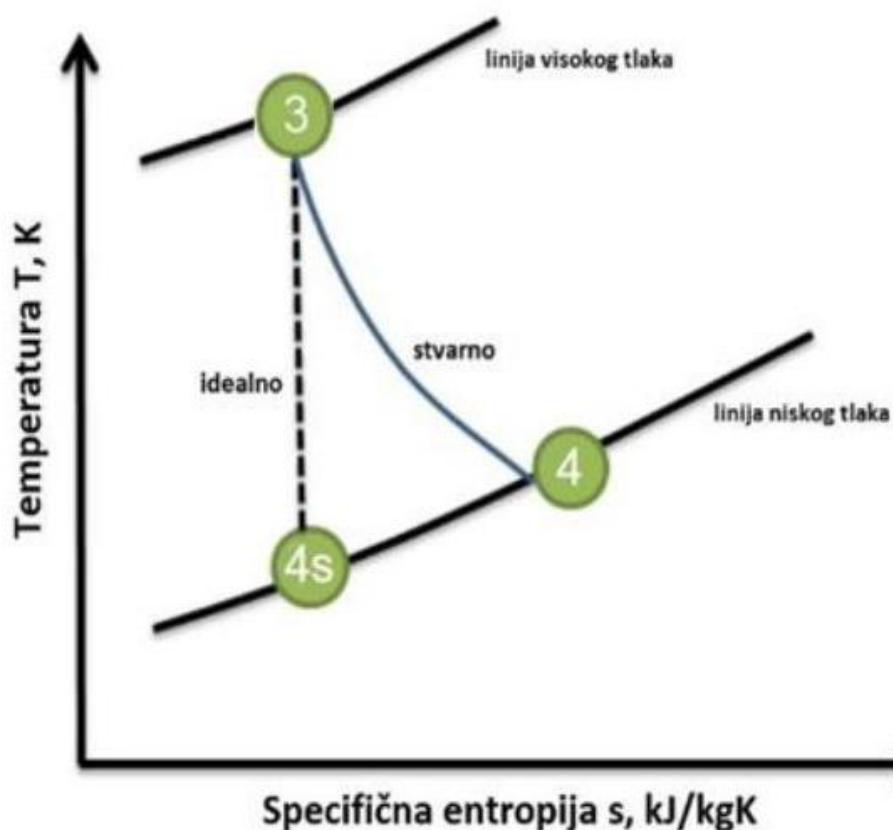
U ovom se slučaju radi o idealnom ORC procesu, pa se zagrijavanje i hlađenje radne tvari odvijaju pri konstantnom tlaku, a procesi ekspanzije u turbini i dizanja tlaka u pumpi se odvijaju izentropski.

### 3.2. Proračun komponenti ORC postrojenja

U sklopu zadatka definirana je snaga postrojenja od 125 kW, te je potrebno proračunati komponente postrojenja tako da se na električnom generatoru ostvari željena snaga. Odabrani tlakovi između kojih će se proces voditi su tlak kondenzacije  $p_k = 2$  bar i tlak isparavanja  $p_i = 15.5$  bar. Radi pojednostavljenja termodinamičkog proračuna pretpostaviti će se da u turbinu ulazi suhozasićena para, a u pumpu ulazi vrela kapljevina.

#### 3.2.1. Turbina

Djelovanje turbine se definira preko njene izentropske iskoristivosti. Na [Slika 7.] se može vidjeti prikaz stvarnog i idealnog rada turbine u T,s dijagramu.



Slika 7. T,s dijagram za turbinu [9]

Izentropska iskoristivost turbine definirana je preko sljedećeg izraza:

$$\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (20)$$

iz čega se može vidjeti da je stvarni rad manji od idealnog, te se stvarni rad u vremenu izražava kao:

$$P_T = m_{rt}(h_3 - h_4) \quad (21)$$

Ako se pretpostavi da je iskoristivost električnog generatora 97%, potrebna mehanička snaga na turbini iznosi približno 129 kW. Uz prethodne pretpostavke i odabrane vrijednosti moguće je odrediti ulaznu entalpiju u turbinu  $h_3$  i izentropsku izlaznu entalpiju  $h_{4s}$ . Uzme li se da je izentropska iskoristivost turbine 75% iz prethodnih se izraza mogu odrediti stvarna izlazna entalpija  $h_4$  i maseni protok radne tvari u procesu  $m_{rt}$ .

$$h_4 = h_3 - \eta_T(h_3 - h_{4s}) \quad (22)$$

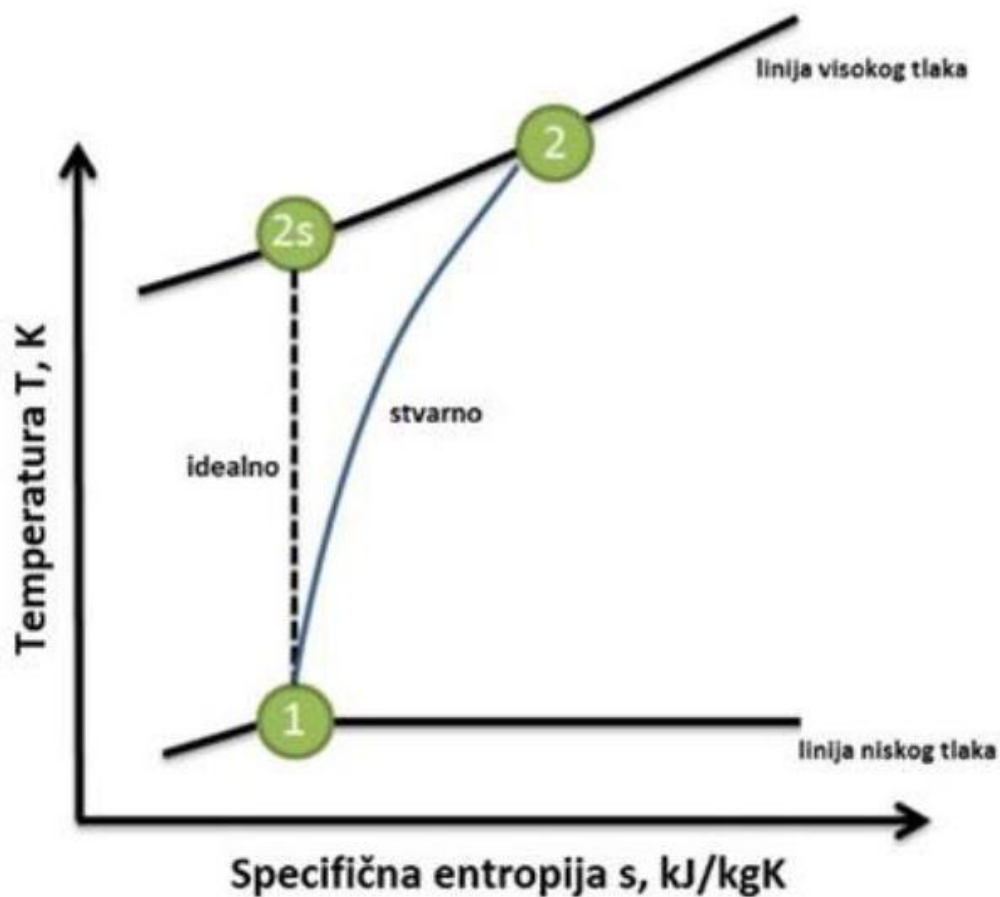
$$m_{rt} = \frac{P_T}{h_3 - h_4} \quad (23)$$

**Tablica 3. Vrijednosti parametara turbine**

Parametar	Vrijednost
$P_T$	129 kW
$h_3$	332,57 kJ/(kgK)
$h_4$	303,97 kJ/(kgK)
$T_3$	109,55 °C
$T_4$	58,35 °C
$m_{rt}$	4,51 kg/s

### 3.2.2. Pumpa

Kao i kod turbine, djelovanje pumpe se definira njenom izentropskom iskoristivošću. Na [Slika 8.] se može vidjeti prikaz stvarnog i idealnog rada pumpe u T,s dijagramu.



Slika 8. T,s dijagram za pumpu [9]

Izentropska iskoristivost pumpe se definira kao:

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (24)$$

iz čega se može vidjeti da je stvarni rad manji od idealnog.

Uz prethodne pretpostavke i odabrane vrijednosti moguće je odrediti ulaznu entalpiju u turbinu  $h_1$  i izentropsku izlaznu entalpiju  $h_{2s}$ . S obzirom da je poznat maseni protok radne tvari uz odabranu izentropsku iskoristivost od 65%, može se izračunati snaga pumpe  $P_P$  i entalpija na ulazu u isparivač  $h_2$ .

$$h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_P} + h_1 \quad (25)$$

$$P_P = m_{rt}(h_2 - h_1) \quad (26)$$

**Tablica 4. Vrijednosti parametara pumpe**

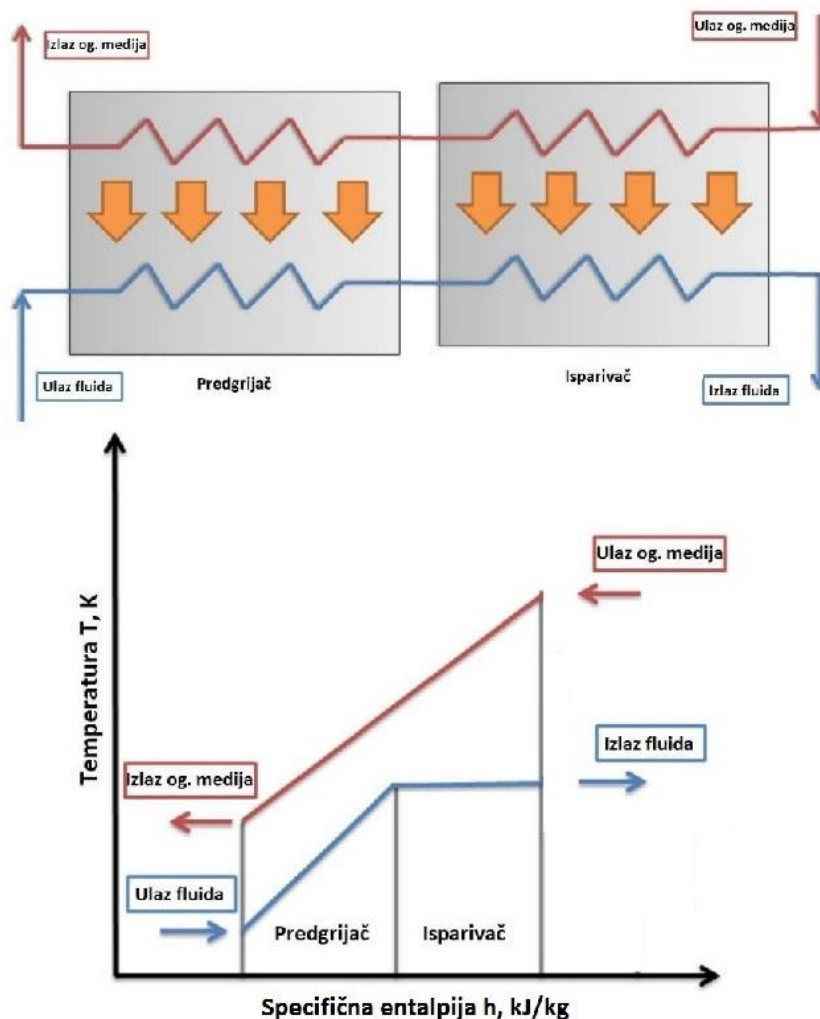
Parametar	Vrijednost
$P_p$	7,1 kW
$h_1$	94,174 kJ/(kgK)
$h_2$	95,74 kJ/(kgK)
$T_1$	33,16 °C
$T_2$	34,06 °C

### 3.2.3. Isparivač

Prethodno je navedeno da se u isparivaču odvijaju 3 procesa: predgrijanje, isparivanje i pregrijavanje, ali za potrebe termodinamičkog proračuna u ovom je slučaju pregrijavanje zanemareno, tako da se isparivač sastoji samo od predgrijačkog i isparivačkog dijela. Isparivač je osmišljen kao protusmjerni *Shell&Tube* izmjenjivač gdje radna tvar struji unutar cijevi, a ogrjevni medij (voda) struji oko cijevi. Dimenzije i materijal cijevi su odabrani kao i za izmjenjivač dimni plinovi/voda.

Na [Slika 9.] se može vidjeti shematski prikaz dijelova isparivača i dijagram prijelaza topline sa naznačenim dijelovima isparivača.





Slika 9. Prijelaz topline u isparivaču [9]

Za izračunavanje toplinskog toka izmijenjenog između ogrjevnog medija (vode) i radne tvari potrebno je riješiti sustav od tri jednačbe.

$$\phi_{isp} = m_w c_w (T_{w,u,isp} - T_{w,i,isp}) \quad (27)$$

$$\phi_{isp} = k_{isp} A_{isp} \Delta T_{m,isp} \quad (28)$$

$$\phi_{isp} = m_{rt} (h_{rt,i,isp} - h_{rt,u,isp}) \quad (29)$$

Sustav se postavlja za svaki dio isparivača, te se zbog njihove međuovisnosti u ovom slučaju dobije sustav od 6 jednadžbi. S obzirom da su poznate vrijednosti entalpije radne tvari u svim točkama procesa, moguće je izračunati izmijenjeni toplinski tok u svakom dijelu izmjenjivača, te preko dobivenih vrijednosti odrediti promjenu temperature vode.

$$\phi_{isp} = m_{rt}(h_{rt,i,isp} - h_{rt,u,isp}) \quad (30)$$

$$T_{w,i,isp} = T_{w,u,isp} - \frac{\phi_{isp}}{m_w c_w} \quad (31)$$

Ukupni izmijenjeni toplinski tok se dobije zbrajanjem pojedinih toplinskih tokova. Za određivanje površine izmjene topline potrebno je poznavati koeficijent prolaza topline. Koeficijent prolaza topline se izračunava preko koeficijenata prijelaza topline fluida i geometrije izmjenjivača. Za potrebe ovog rada, približne vrijednosti koeficijenata prijelaza topline su uzete iz dostupne literature [10]:

$$\alpha_{pred} = 1000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\alpha_{isp} = 10000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\alpha_w = 1000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Izraz za koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi glasi:

$$k_{isp} = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u} \frac{1}{\alpha_u} + \frac{d_v}{2\lambda_{st}} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_v}} \quad (32)$$

Također je potrebno odrediti srednju logaritamsku razliku temperatura:

$$\Delta T_{m,isp} = \frac{(T_{w,u,isp} - T_{rt,i,isp}) - (T_{w,i,isp} - T_{rt,u,isp})}{\ln \frac{T_{w,u,isp} - T_{rt,i,isp}}{T_{w,i,isp} - T_{rt,u,isp}}} \quad (33)$$

Izraz za površinu pojedinog dijela isparivača glasi:

$$A_{isp} = \frac{\phi_{isp}}{k_{isp}\Delta T_{m,isp}} \quad (34)$$

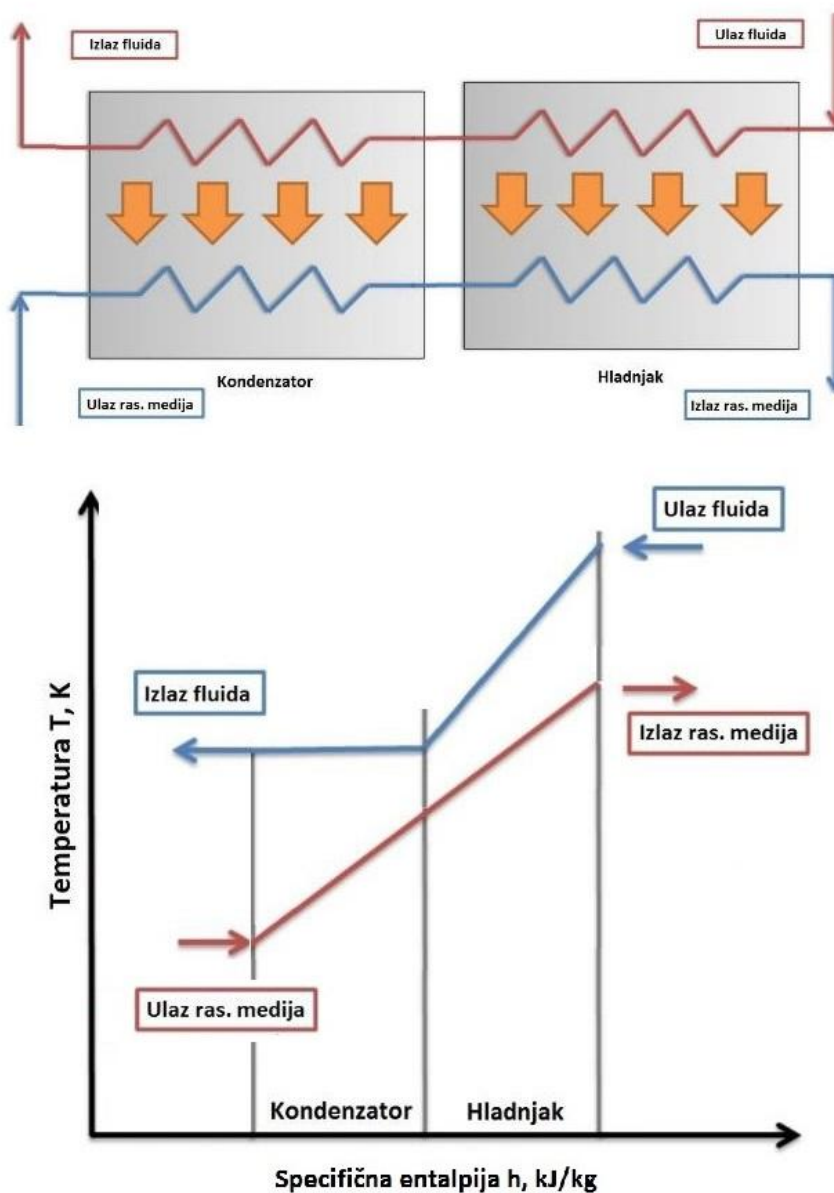
Ukupna površina izmjene topline u isparivaču se dobije zbrajanjem površina pojedinačnih dijelova.

**Tablica 5. Vrijednosti parametara isparivača**

Parametar	Vrijednost
$T_{w,u,isp}$	150 °C
$\Phi_{pred}$	465,52 kW
$A_{pred}$	17,62 m <sup>2</sup>
$\Delta T_{m,pred}$	60,41 °C
$T_{w,u,pred}$	142,1 °C
$\Phi_{isp}$	534,48 kW
$A_{isp}$	17,3 m <sup>2</sup>
$\Delta T_{m,isp}$	36,34 °C
$T_{w,i,isp}$	135 °C
$\Phi_{isp,uk}$	1000 kW
$A_{isp,uk}$	34,92 m <sup>2</sup>

### 3.2.4. Kondenzator

Poput isparivača, u kondenzatoru se odvijaju tri procesa: hlađenje, kondenzacija i pothlađivanje. Za potrebe ovog proračuna promatrati će se proces bez pothlađivanja, pa se u kondenzatoru odvija samo hlađenje i kondenzacija. U ovom slučaju se radi o protusmjernom *Shell&Tube* izmjenjivaču gdje radna tvar kondenzira na vanjskoj strani cijevi, a rashladni medij struji u cijevi. Dimenzije i materijal cijevi su isti kao i kod isparivača. Za rashladni medij u ovom slučaju je odabrana voda temperature 10°C i masenog protoka 15 kg/s.



Slika 10. Prijelaz topline u kondenzatoru [9]

Na [Slika 10.] se može vidjeti shematski prikaz dijelova kondenzatora i dijagram prijelaza topline sa naznačenim dijelovima kondenzatora.

Za izračunavanje toplinskog toka izmijenjenog između rashladnog medija (vode) i radne tvari potrebno je riješiti sustav od tri jednadžbe.

$$\phi_{kond} = m_w c_w (T_{w,i,kond} - T_{w,u,kond}) \quad (35)$$

$$\phi_{kond} = k_{kond} A_{kond} \Delta T_{m,kond} \quad (36)$$

$$\phi_{kond} = m_{rt}(h_{rt,u,kond} - h_{rt,i,kond}) \quad (37)$$

Sustav se postavlja za svaki dio kondenzatora, te se zbog njihove međuovisnosti u ovom slučaju dobije sustav od 6 jednadžbi. S obzirom da su poznate vrijednosti entalpije radne tvari u svim točkama procesa, moguće je izračunati izmijenjeni toplinski tok u svakom dijelu kondenzatora, te preko dobivenih vrijednosti odrediti promjenu temperature vode.

$$\phi_{kond} = m_w c_w (T_{w,i,kond} - T_{w,u,kond}) \quad (38)$$

$$T_{w,i,kond} = T_{w,u,kond} + \frac{\phi_{kond}}{m_w c_w} \quad (39)$$

Ukupni izmijenjeni toplinski tok se dobije zbrajanjem pojedinih toplinskih tokova. Za određivanje površine izmjene topline potrebno je poznavati koeficijent prolaza topline. Koeficijent prolaza topline se izračunava preko koeficijenata prijelaza topline fluida i geometrije izmjenjivača. Za potrebe ovog rada, približne vrijednosti koeficijenata prijelaza topline su uzete iz dostupne literature [10]:

$$\alpha_{hl} = 140 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\alpha_{kond} = 10000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$\alpha_w = 700 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Izraz za koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi glasi:

$$k_{isp} = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u} \frac{1}{\alpha_u} + \frac{d_v}{2\lambda_{st}} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_v}} \quad (40)$$

Također je potrebno odrediti srednju logaritamsku razliku temperatura:

$$\Delta T_{m,kond} = \frac{(T_{rt,i,kond} - T_{w,u,kond}) - (T_{rt,u,kond} - T_{w,i,kond})}{\ln \frac{T_{rt,i,kond} - T_{w,u,kond}}{T_{rt,u,kond} - T_{w,i,kond}}} \quad (41)$$

Izraz za površinu pojedinog dijela kondenzatora glasi:

$$A_{kond} = \frac{\Phi_{kond}}{k_{kond} \Delta T_{m,kond}} \quad (42)$$

Ukupna površina izmjene topline u kondenzatoru se dobije zbrajanjem površina pojedinačnih dijelova.

**Tablica 6. Vrijednosti parametara kondenzatora**

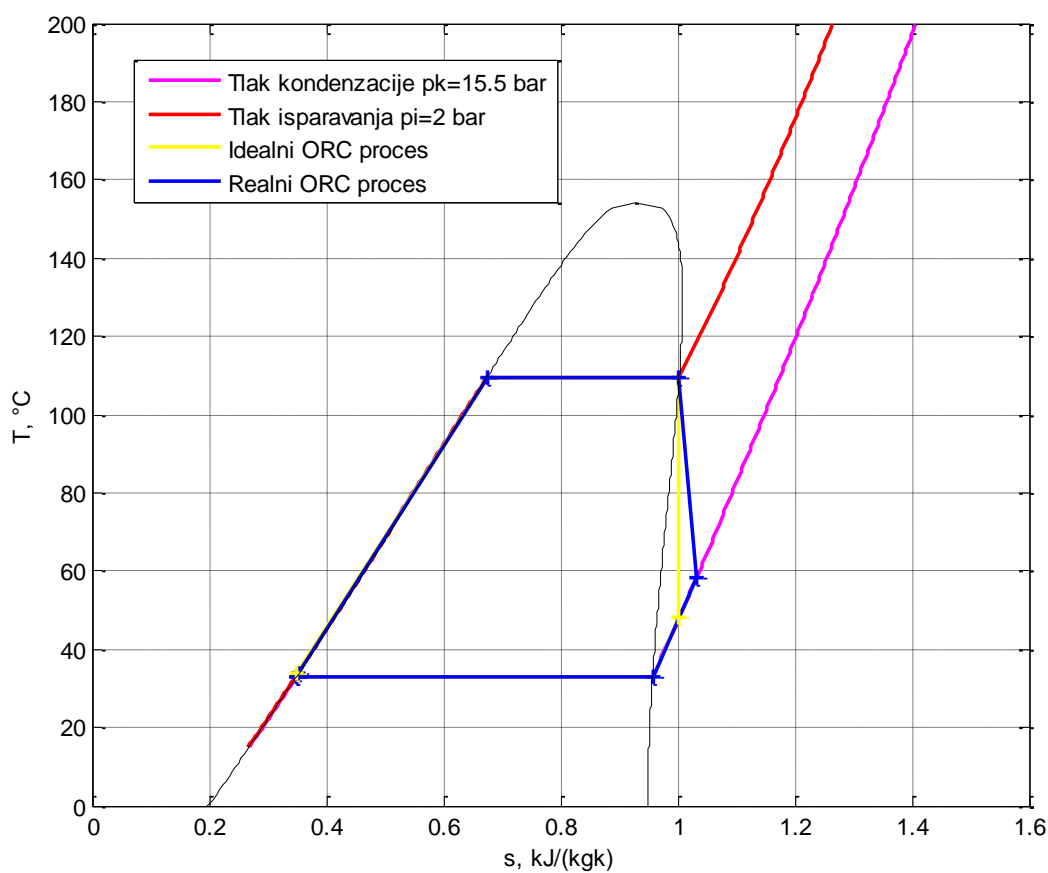
Parametar	Vrijednost
$T_{w,u,kond}$	10 °C
$\Phi_{hl}$	107,4 kW
$A_{hl}$	37,34 m <sup>2</sup>
$\Delta T_{m,hl}$	26,94 °C
$T_{w,u,hl}$	11,71 °C
$\Phi_{kond}$	838,7 kW
$A_{kond}$	87,44 m <sup>2</sup>
$\Delta T_{m,kond}$	22,3 °C
$T_{w,i,kond}$	25,1 °C
$\Phi_{kond,uk}$	946,1 kW
$A_{kond,uk}$	124,78 m <sup>2</sup>

### 3.3. Stupanj djelovanja ORC procesa

Nakon što su definirani stupanj djelovanja i snaga turbine i pumpe, te snaga isparivača, moguće je definirati stupanj djelovanja procesa za stacionarno stanje. Iskoristivost cijelog procesa je jednaka:

$$\eta_{ORC} = \frac{P_T - P_P}{\phi_{isp,uk}} = 12,19 \% \quad (43)$$

### 3.4. Prikaz ORC procesa u T,s dijagramu



Slika 11. T,s dijagram idealnog i realnog ORC procesa [11]

Na [Slika 11.] se može vidjeti prikaz procesa koji se odvija u zadanom ORC postrojenju. Za usporedbu je također postavljena idealna verzija tog procesa. Dok kod turbine postoji vidljiva razlika između izentropske i politropske ekspanzije, kod pumpe je to zanemarivo.

## 4. MATEMATIČKI MODEL ORC POSTROJENJA

Matematički model sustava se izvodi postavljanjem osnovnih zakona očuvanja na elemente sustava. U ovome slučaju postaviti će se zakoni očuvanja na sustav izmjenjivača topline dimni plinovi/voda, isparivač radne tvari i kondenzator radne tvari.

### 4.1. Matematički model izmjenjivača topline dimni plinovi/voda

Matematički model izmjenjivača topline dimni plinovi/voda je baziran na postavljanju bilance energije dimnih plinova, stijenke cijevi i vode. Zakoni očuvanja mase i količine gibanja se u ovom slučaju zanemaruju radi pojednostavljenja modela i činjenice da količina gibanja u ovom slučaju nije bitna, a promjena mase bi se mogla pojaviti samo na strani dimnih plinova gdje ne bi bila relevantna za ovaj slučaj. Izmjenjivač će biti podijeljen na 6 segmenata kako bi se dobio točniji profil temperature, te će bilanca energije biti postavljena za svaki segment.

$$\frac{dE}{dt} = \sum e_u - \sum e_i \quad (44)$$

#### 4.1.1. Bilanca energije dimnih plinova

Promjena unutrašnje energije dimnih plinova je jednaka sumi svih toplinskih tokova koji prolaze kroz granice sustava dimnih plinova. U ovom slučaju u segment ulazi toplina dovedena protokom dimnih plinova iz prethodnog segmenta (ili u slučaju prvog segmenta energija dovedena iz bioplinskog postrojenja). Iz segmenta izlazi toplina odvedena protokom dimnih plina i toplina koja se uslijed razlike temperatura prenosi na cijevnu stijenku. Promjena energije dimnih plinova je jednaka umnošku promjene temperature, masom dimnih plinova u segmentu i specifičnim toplinskim kapacitetom dimnih plinova. Skup jednadžbi koji čini bilancu energije rashladnog medija je:

$$\frac{dE}{dt} = M_{dp} c_{dp} \frac{dT_{dpj}}{dt} \quad (45)$$



$$\sum e_u = m_{dp} c_{dp} T_{dp(j-1)} \quad (46)$$

$$\sum e_i = m_{dp} c_{dp} T_{dpj} + \alpha_{dp} A_{dp} (T_{dpj} - T_{stj}) \quad (47)$$

Nakon uvrštavanja u izraz za bilancu energije i sređivanja izraza, dobiveni su sljedeći izrazi.

Za  $j=1$ :

$$\frac{dT_{dp1}}{dt} = \frac{1}{M_{dp} c_{dp}} [m_{dp} c_{dp} (T_{dp_u} - T_{dp1}) - \alpha_{dp} A_{dp} (T_{st1} - T_{dp1})] \quad (48)$$

Za  $j=2,3,\dots,6$ :

$$\frac{dT_{dpj}}{dt} = \frac{1}{M_{dp} c_{dp}} [m_{dp} c_{dp} (T_{dp(j-1)} - T_{dpj}) - \alpha_{dp} A_{dp} (T_{dp(j-1)} - T_{dpj})] \quad (49)$$

#### 4.1.2. Bilanca energije cijevne stijenke

Promjena unutrašnje energije cijevne stijenke jest promjena temperature stijenke promatranog segmenta pomnožena s masom tog segmenta i specifičnim toplinskim kapacitetom stijenke. Ulazni tok energije je toplinski tok predan od strane dimnih plinova na stijenku, a izlazni onaj koji stijenka predaje vodi.

$$\frac{dE}{dt} = M_{st} c_{st} \frac{dT_{stj}}{dt} \quad (50)$$

$$\sum e_u = \alpha_{dp} A_{dp} (T_{dpj} - T_{stj}) \quad (51)$$

$$\sum e_i = \alpha_w A_w (T_{stj} - T_{wj}) \quad (52)$$

Nakon uvrštavanja u izraz za bilancu energije i sređivanja izraza dobiveni su sljedeći izrazi.  
Za  $j=1, \dots, 6$ :

$$\frac{dT_{stj}}{dt} = \frac{1}{M_{st}c_{st}} \left[ \alpha_{dp} A_{dp} (T_{dpj} - T_{stj}) - \alpha_w A_w (T_{stj} - T_{wj}) \right] \quad (53)$$

#### 4.1.3. Bilanca energije vode

Promjena energije struje vode unutar segmenta je jednaka umnošku promjene temperature, mase vode u segmentu i specifičnog toplinskog kapaciteta vode. Ulazni energetski tok je toplina dovedena protokom vode u segment i toplina predana sa stijenke na tok vode, dok je izlazni tok toplina izvedena iz segmenta protokom vode.

$$\frac{dE}{dt} = M_w c_w \frac{dT_{wj}}{dt} \quad (54)$$

$$\sum e_u = m_w c_w T_{wj-1} + \alpha_w A_w (T_{stj} - T_{wj}) \quad (55)$$

$$\sum e_i = m_w c_w T_{wj} \quad (56)$$

Nakon uvrštavanja u izraz za bilancu energije i sređivanja izraza, dobiveni su sljedeći izrazi.

Za  $j=1$ :

$$\frac{dT_{w1}}{dt} = \frac{1}{M_w c_w} \left[ m_w c_w (T_{wu} - T_{w1}) + \alpha_w A_w (T_{st1} - T_{w1}) \right] \quad (57)$$

Za  $j=2, 3, \dots, 6$ :

$$\frac{dT_{wj}}{dt} = \frac{1}{M_w c_w} \left[ m_w c_w (T_{wj-1} - T_{wj}) + \alpha_w A_w (T_{stj} - T_{wj}) \right] \quad (58)$$

#### 4.1.4. Dopunske jednadžbe

Kako bi se sustav jednadžbi mogao riješiti u potpunosti potrebno je koristiti dopunske jednadžbe za računanje masa vode, cijevne stijenke i dimnih plinova po segmentima, te neke ranije odabrane vrijednosti ili izračunate vrijednosti vezane za geometriju izmjenjivača.

### 4.2. Matematički model isparivača radne tvari

Matematički model isparivača radne tvari je baziran na postavljanju bilance energije radne tvari, stijenke cijevi i vode. Zakoni očuvanja mase i količine gibanja se u ovom slučaju zanemaruju radi pojednostavljenja modela. Isparivač će biti podijeljen na 6 segmenata kako bi se dobio točniji profil temperature, te će bilanca energije biti postavljena za svaki segment.

$$\frac{dE}{dt} = \sum e_u - \sum e_i \quad (59)$$

#### 4.2.1. Bilanca energije vode

Promjena energije struje vode unutar segmenta je jednaka umnošku promjene temperature, mase vode u segmentu i specifičnog toplinskog kapaciteta vode. Ulazni energetski tok je toplina dovedena protokom vode u segment, dok je izlazni tok toplina izvedena iz segmenta protokom vode i toplina predana s toka vode na stijenku.

$$\frac{dE}{dt} = M_w c_w \frac{dT_{wj}}{dt} \quad (60)$$

$$\sum e_u = m_w c_w T_{wj-1} \quad (61)$$

$$\sum e_i = m_w c_w T_{wj} + \alpha_w A_w (T_{wj} - T_{stj}) \quad (62)$$

Nakon uvrštavanja u izraz za bilancu energije i sređivanja izraza, dobiveni su sljedeći izrazi.

Za  $j=1$ :

$$\frac{dT_{w1}}{dt} = \frac{1}{M_w c_w} \left[ m_w c_w (T_{w_u} - T_{w1}) - \alpha_w A_w (T_{w1} - T_{st1}) \right] \quad (63)$$

Za  $j=2,3,\dots,6$ :

$$\frac{dT_{wj}}{dt} = \frac{1}{M_w c_w} \left[ m_w c_w (T_{wj-1} - T_{wj}) - \alpha_w A_w (T_{wj} - T_{stj}) \right] \quad (64)$$

#### 4.2.2. Bilanca energije cijevne stijenke

Promjena unutrašnje energije cijevne stijenke jest promjena temperature stijenke promatranog segmenta pomnožena s masom tog segmenta i specifičnim toplinskim kapacitetom stijenke. Ulazni tok energije je toplinski tok predan od strane toka vode na stijenku, a izlazni onaj koji stijenka predaje radnoj tvari.

$$\frac{dE}{dt} = M_{st} c_{st} \frac{dT_{stj}}{dt} \quad (65)$$

$$\sum e_u = \alpha_w A_w (T_{wj} - T_{stj}) \quad (66)$$

$$\sum e_i = \alpha_{rt} A_{rt} (T_{stj} - T_{rtj}) \quad (67)$$

Nakon uvrštavanja u izraz za bilancu energije i sređivanja izraza dobiveni su sljedeći izrazi.

Za  $j=1,\dots,6$ :

$$\frac{dT_{stj}}{dt} = \frac{1}{M_{st} c_{st}} \left[ \alpha_w A_w (T_{wj} - T_{stj}) - \alpha_{rt} A_{rt} (T_{stj} - T_{rtj}) \right] \quad (68)$$

### 4.2.3. Bilanca energije radne tvari

Pošto unutar isparivača radna tvar mijenja agregatno stanje u jednom dijelu izmjenjivača temperatura se neće mijenjati ali će unutrašnja energija toka radne tvari rasti. Zbog toga je promjena energije struje radne tvari unutar segmenta jednaka umnošku promjene entalpije radne tvari i mase radne tvari u segmentu. Ulazni energetske tok je toplina dovedena protokom radne tvari u segment i toplina predana sa stijenke na tok radne tvari, dok je izlazni tok toplina izvedena iz segmenta protokom radne tvari.

$$\frac{dE}{dt} = M_{rt} \frac{dh_{rtj}}{dt} \quad (69)$$

$$\sum e_u = m_{rt} h_{w_{j-1}} + \alpha_{rt} A_{rt} (T_{stj} - T_{rtj}) \quad (70)$$

$$\sum e_i = m_{rt} h_{w_j} \quad (71)$$

Nakon uvrštavanja u izraz za bilancu energije i sređivanja izraza, dobiveni su sljedeći izrazi.

Za j=1:

$$\frac{dh_{rt1}}{dt} = \frac{1}{M_{rt}} [m_{rt} (h_{w_u} - h_{w_1}) + \alpha_w A_w (T_{st1} - T_{w_1})] \quad (72)$$

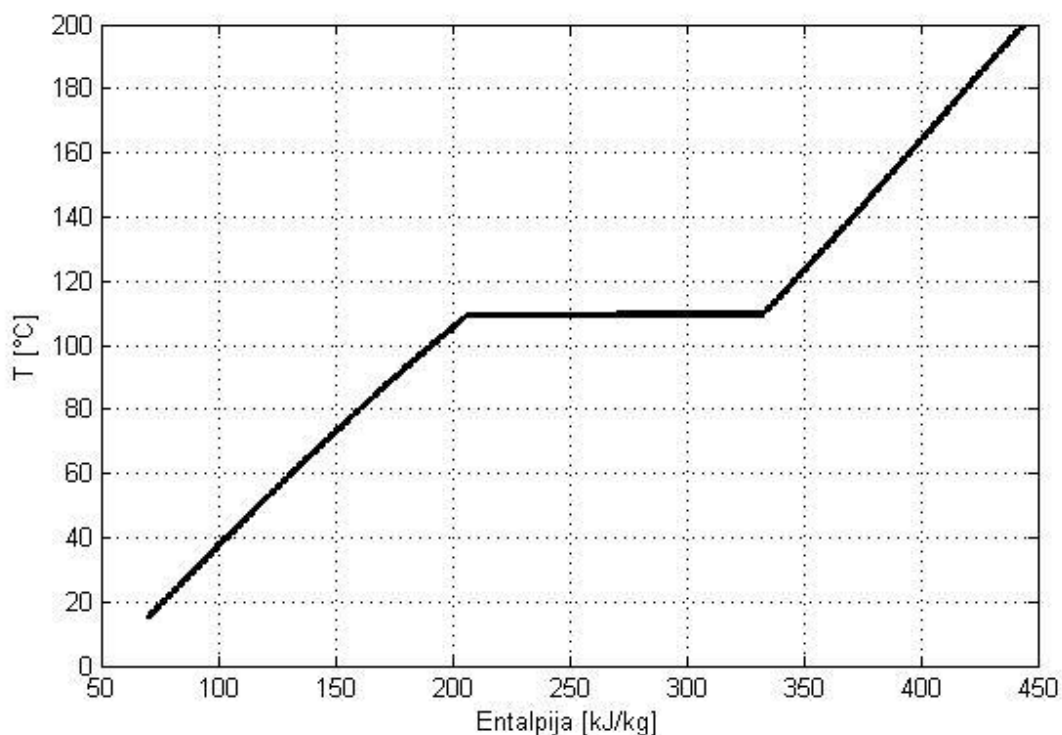
Za j=2,3,...,6:

$$\frac{dh_{rtj}}{dt} = \frac{1}{M_{rt}} [m_{rt} (h_{w_{j-1}} - h_{w_j}) + \alpha_{rt} A_{rt} (T_{stj} - T_{rtj})] \quad (73)$$

#### 4.2.4. Dopunske jednadžbe za matematički model isparivača

Kako bi se sustav jednadžbi mogao riješiti u potpunosti potrebno je koristiti dopunske jednadžbe za računanje masa vode, cijevne stijenke i radne tvari po segmentima, te neke ranije odabrane vrijednosti ili izračunate vrijednosti vezane za geometriju izmjenjivača.

Poveznica između entalpije radne tvari i temperature radne tvari nije dana matematičkim izrazom već je definirana dijagramom. [Slika 12.]



Slika 12. Krivulja ovisnosti temperature o entalpiji na tlaku isparavanja [11]

### 4.3. Matematički model kondenzatora radne tvari

Matematički model kondenzatora radne tvari je baziran na postavljanju bilance energije radne tvari, stijenke cijevi i rade. Zakoni očuvanja mase i količine gibanja se u ovom slučaju zanemaruju radi pojednostavljenja modela. Isparivač će biti podijeljen na 6 segmenata kako bi se dobio točniji profil temperature, te će bilanca energije biti postavljena za svaki segment.

$$\frac{dE}{dt} = \sum e_u - \sum e_i \quad (74)$$

### 4.3.1. Bilanca energije rashladne vode

Promjena energije struje vode unutar segmenta je jednaka umnošku promjene temperature, mase vode u segmentu i specifičnog toplinskog kapaciteta vode. Ulazni energetski tok je toplina dovedena protokom vode u segment i toplina predana sa stijenke na tok vode, dok je izlazni tok toplina izvedena iz segmenta protokom vode.

$$\frac{dE}{dt} = M_w c_w \frac{dT_{wj}}{dt} \quad (75)$$

$$\sum e_u = m_w c_w T_{wj-1} + \alpha_w A_w (T_{stj} - T_{wj}) \quad (76)$$

$$\sum e_i = m_w c_w T_{wj} \quad (77)$$

Nakon uvrštavanja u izraz za bilancu energije i sređivanja izraza, dobiveni su sljedeći izrazi.

Za  $j=1$ :

$$\frac{dT_{w1}}{dt} = \frac{1}{M_w c_w} [m_w c_w (T_{wu} - T_{w1}) + \alpha_w A_w (T_{st1} - T_{w1})] \quad (78)$$

Za  $j=2,3,\dots,6$ :

$$\frac{dT_{wj}}{dt} = \frac{1}{M_w c_w} [m_w c_w (T_{wj-1} - T_{wj}) + \alpha_w A_w (T_{stj} - T_{wj})] \quad (79)$$

### 4.3.2. Bilanca energije cijevne stijenke

Promjena unutrašnje energije cijevne stijenke jest promjena temperature stijenke promatranog segmenta pomnožena s masom tog segmenta i specifičnim toplinskim kapacitetom stijenke. Ulazni tok energije je toplinski tok predan od strane radne tvari na stijenku, a izlazni onaj koji stijenka predaje vodi.

$$\frac{dE}{dt} = M_{st} c_{st} \frac{dT_{stj}}{dt} \quad (80)$$

$$\sum e_u = \alpha_{rt} A_{rt} (T_{rtj} - T_{stj}) \quad (81)$$

$$\sum e_i = \alpha_w A_w (T_{stj} - T_{wj}) \quad (82)$$

Nakon uvrštavanja u izraz za bilancu energije i sređivanja izraza dobiveni su sljedeći izrazi. Za  $j=1, \dots, 6$ :

$$\frac{dT_{stj}}{dt} = \frac{1}{M_{st} c_{st}} \left[ \alpha_{rt} A_{rt} (T_{rtj} - T_{stj}) - \alpha_w A_w (T_{stj} - T_{wj}) \right] \quad (83)$$

#### 4.3.3. Bilanca energije radne tvari

Pošto unutar kondenzatora radna tvar mijenja agregatno stanje u jednom dijelu kondenzatora temperatura se neće mijenjati ali će unutrašnja energija toka radne tvari padati. Zbog toga je promjena energije struje radne tvari unutar segmenta jednaka umnošku promjene entalpije radne tvari i mase radne tvari u segmentu. Ulazni energetske tok je toplina dovedena protokom radne tvari u segment, dok je izlazni tok toplina izvedena iz segmenta protokom radne tvari i toplina predana s toka radne tvari na stijenku.

$$\frac{dE}{dt} = M_{rt} \frac{dh_{rtj}}{dt} \quad (84)$$

$$\sum e_u = m_{rt} h_{wj-1} \quad (85)$$

$$\sum e_i = m_{rt} h_{wj} + \alpha_{rt} A_{rt} (T_{rtj} - T_{stj}) \quad (86)$$



Nakon uvrštavanja u izraz za bilancu energije i sređivanja izraza, dobiveni su sljedeći izrazi.

Za  $j=1$ :

$$\frac{dh_{rt1}}{dt} = \frac{1}{M_{rt}} [m_{rt}(h_{w_u} - h_{w_1}) - \alpha_{rt}A_{rt}(T_{rt_u} - T_{st1})] \quad (87)$$

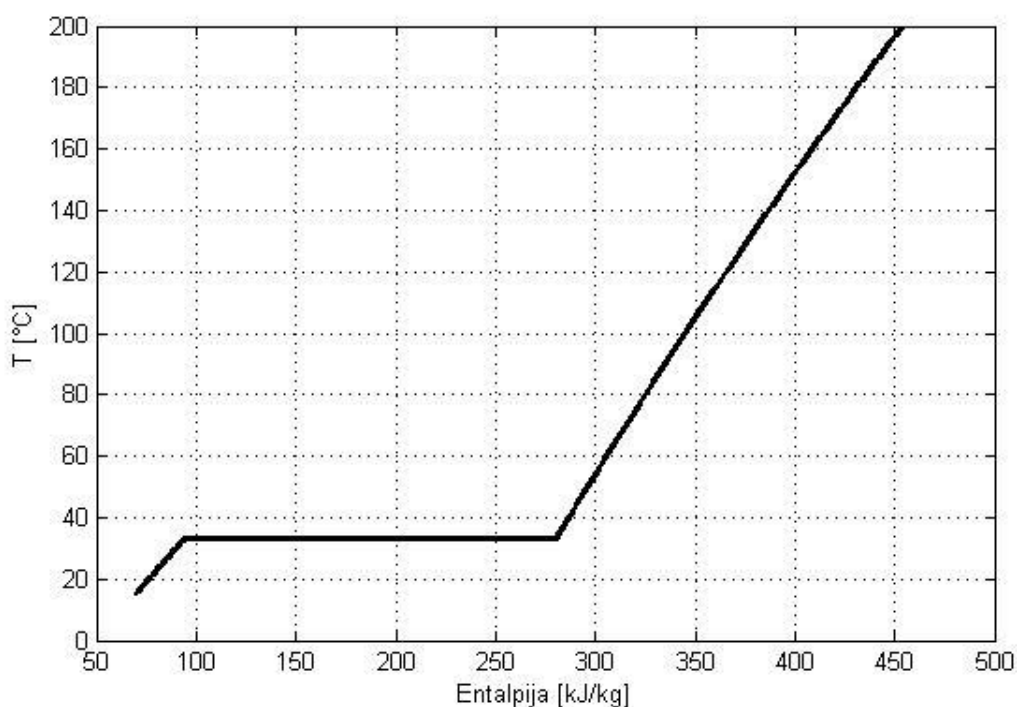
Za  $j=2,3,\dots,6$ :

$$\frac{dh_{rtj}}{dt} = \frac{1}{M_{rt}} [m_{rt}(h_{w_{j-1}} - h_{w_j}) - \alpha_{rt}A_{rt}(T_{rtj} - T_{stj})] \quad (88)$$

#### 4.3.4. Dopunske jednadžbe za matematički model kondenzatora

Kako bi se sustav jednadžbi mogao riješiti u potpunosti potrebno je koristiti dopunske jednadžbe za računanje masa vode, cijevne stijenke i radne tvari po segmentima, te neke ranije odabrane vrijednosti ili izračunate vrijednosti vezane za geometriju izmjenjivača.

Poveznica između entalpije radne tvari i temperature radne tvari nije dana matematičkim izrazom već je definirana dijagramom. [Slika 13.]



**Slika 13. Krivulja ovisnosti temperature o entalpiji na tlaku kondenzacije [11]**

#### **4.4. Turbina i pumpa**

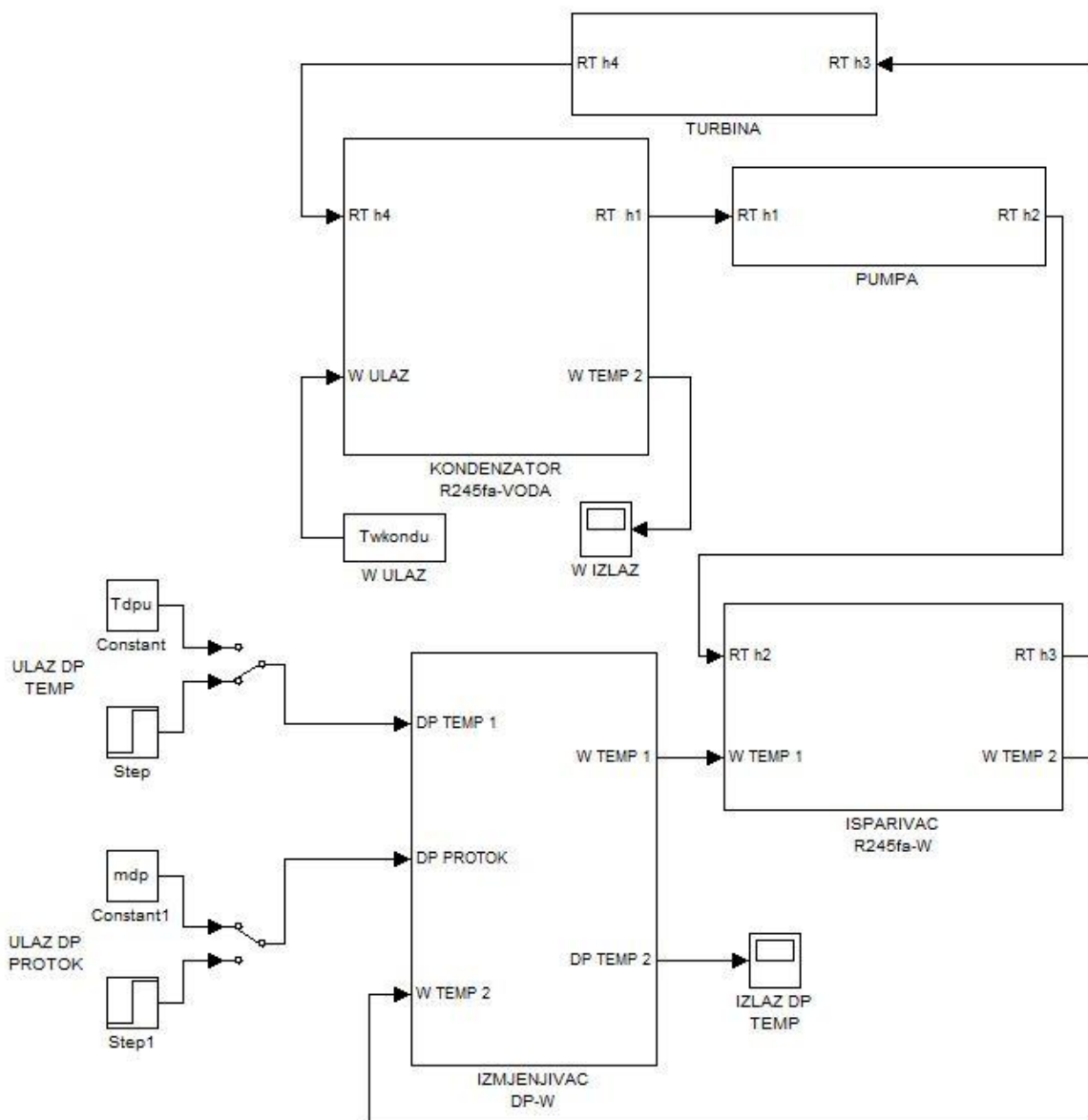
Djelovanje turbine i pumpe na stanje radne tvari ORC postrojenja će biti prikazano preko njihovih izentropskih iskoristivosti i pripadajućih tabličnih vrijednosti entalpije u ovisnosti o tlaku na kojem se radna tvar nalazi.

Na izlasku iz isparivača je poznata entalpija radne tvari. Preko entalpije se određuje entropija radne tvari u toj točki, te se na temelju te entropije pronalazi entalpija na tlaku kondenzacije koja bi se postigla izentropskom ekspanzijom u turbini. Nakon toga se preko izentropske iskoristivosti određuje stvarna entalpija radne tvari na ulasku u kondenzator i snaga dobivena na turbini.

Na izlasku iz kondenzatora je također poznata entalpija radne tvari. Preko entalpije se određuje entropija radne tvari u toj točki, te se na temelju te entropije pronalazi entalpija na tlaku isparavanja koja bi se postigla izentropskom porastom tlaka u pumpi. Nakon toga se preko izentropske iskoristivosti određuje stvarna entalpija radne tvari na ulasku u isparivač i snaga utrošena u pumpi.

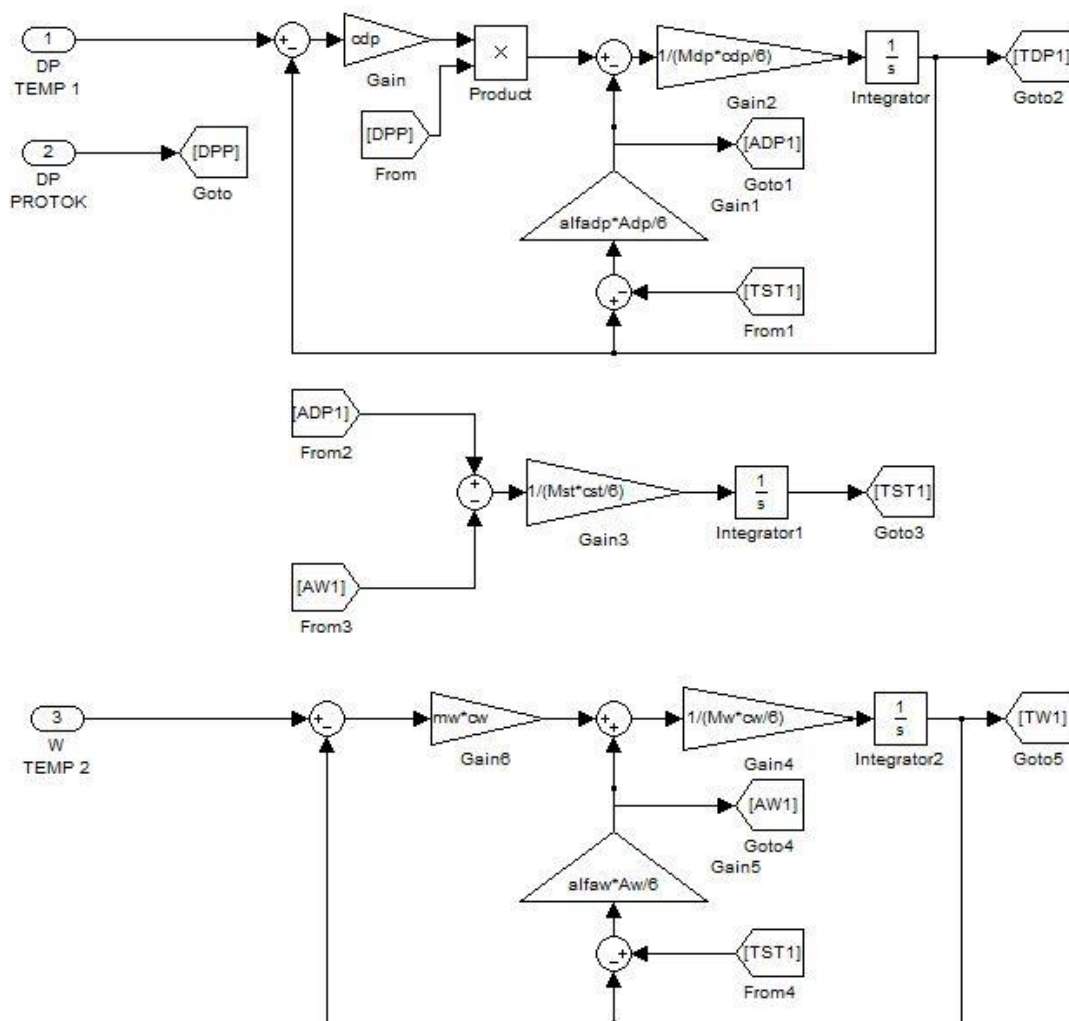
## 5. SIMULINK MODELSKA SHEMA ORC POSTROJENJA

Simulacija dinamike procesa ORC postrojenja se vrši u *Simulink*-u. Komponente postrojenja su definirane blokovima koji u sebi sadrže skupove diferencijalnih jednadžbi prevedene u modelske sheme.



Slika 14. Modelska sheme cijelog ORC postrojenja

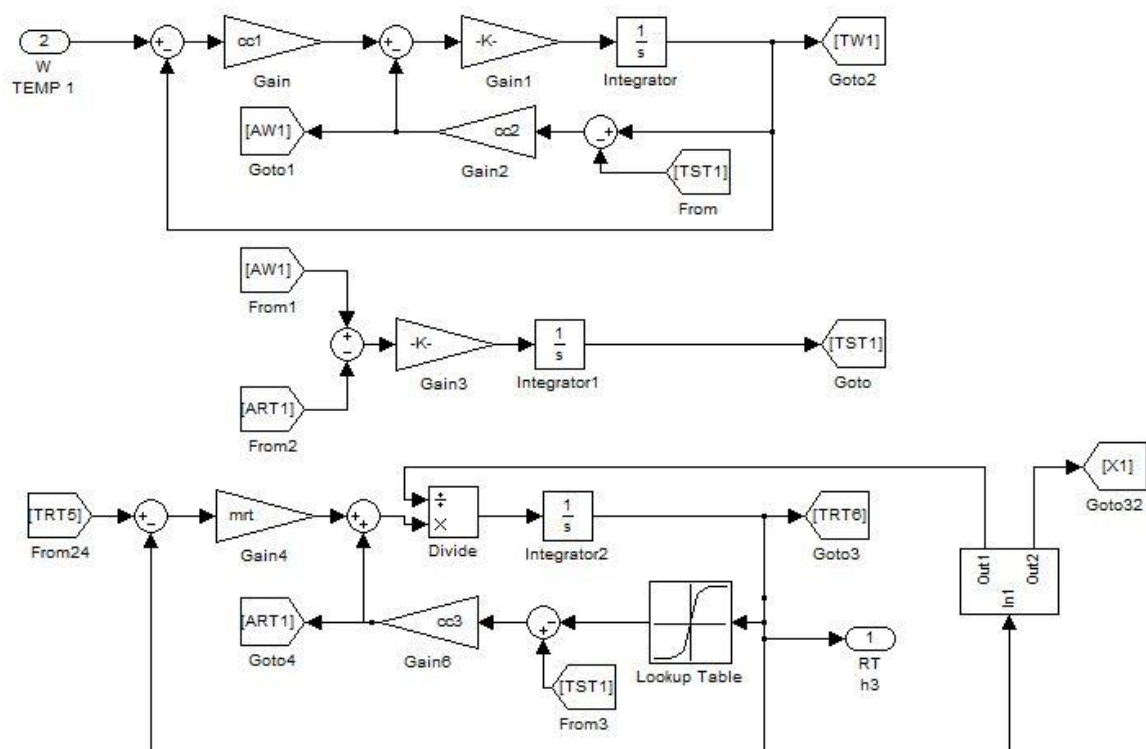
Sa sheme [Slika 14.] se može vidjeti da je blok izmjenjivača topline povezan s ostatkom postrojenja preko temperature toka ogrjevnog medija, tj. vode koja prima toplinu od dimnih plinova bioplinskog postrojenja, dok su ostali blokovi međusobno povezani entalpijom radne tvari na čiju dinamiku utječe promjena temperature vode.



**Slika 15. Modelska shema jednog segmenta izmjenjivača topline**

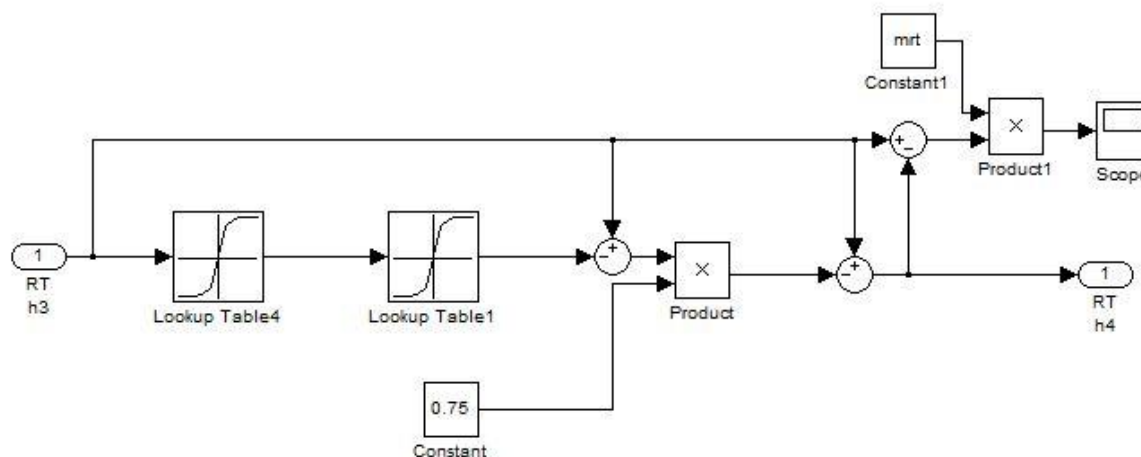
[Slika 15.] prikazuje modelsku shemu jednog segmenta od ukupno šest koji čine model izmjenjivača topline. Vidljivo je da se shema sastoji od tri grupacije blokova koje predstavljaju tri komponente bilance energije izmjenjivača topline: promjenu energije dimnih plinova, promjenu energije cijevne stijenke i promjenu energije vode.

U izmjenjivač topline ulaze dimni plinova odabrane temperature i masenog protoka, što održava stacionarno stanje u sustavu. U sklopu rada je potrebno simulirati odzive pogonskih značajki ORC postrojenja na promjenu protoka i temperature dimnih plinova što se vrši unutar ovog bloka. Unutar ovog bloka promjena stanja struje dimnih plinova izravno utječe na promjenu stanja struje vode i narušava stacionarno stanje u sustavu.



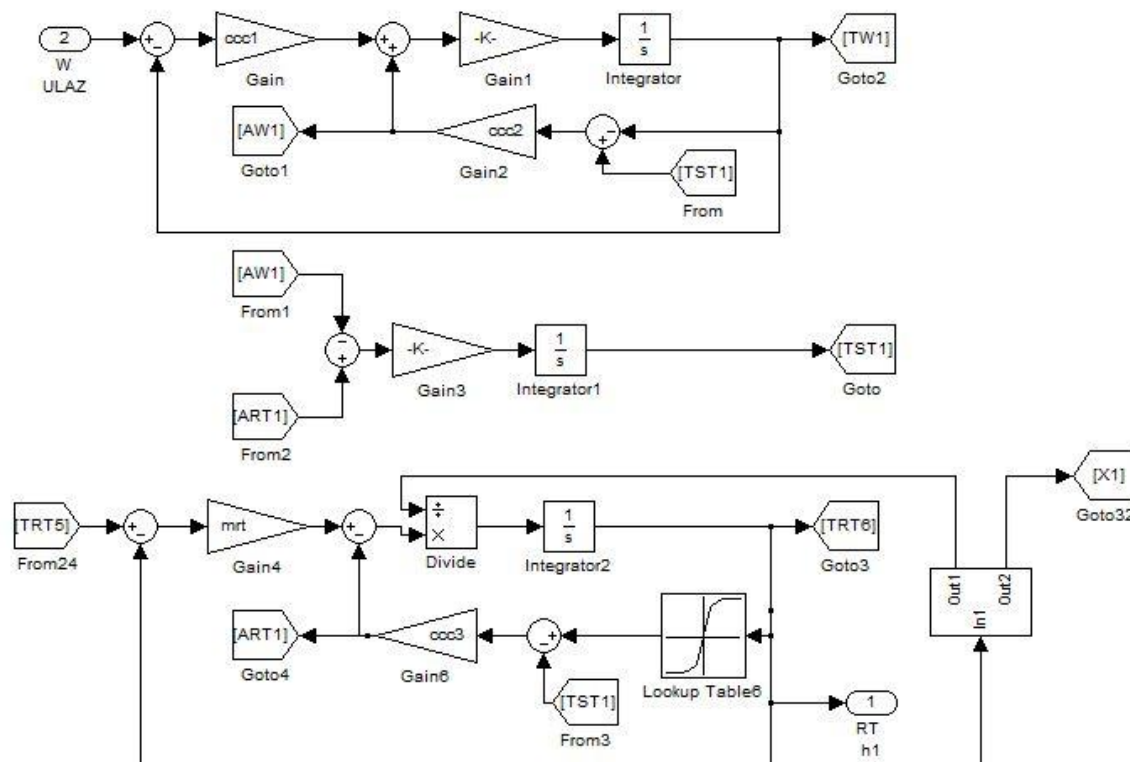
**Slika 16. Modelska shema jednog segmenta isparivača radne tvari**

Kao i prethodna modelska shema i ova se sastoji od tri grupacije blokova [Slika 16.]. Dio modelske sheme koji se odnosi na promjenu energije radne tvari, za razliku od ostatka bloka, ne računa izravno promjenu temperaturu radnog medija na izlazu iz segmenta, već računa entalpiju radne tvari iz koje se preko krivulje definirane tablicom dobiva temperatura radnog medija. Prilikom promjene temperature ili masenog, nastali se poremećaj prenosi u ORC proces promjenom stanja struje vode.



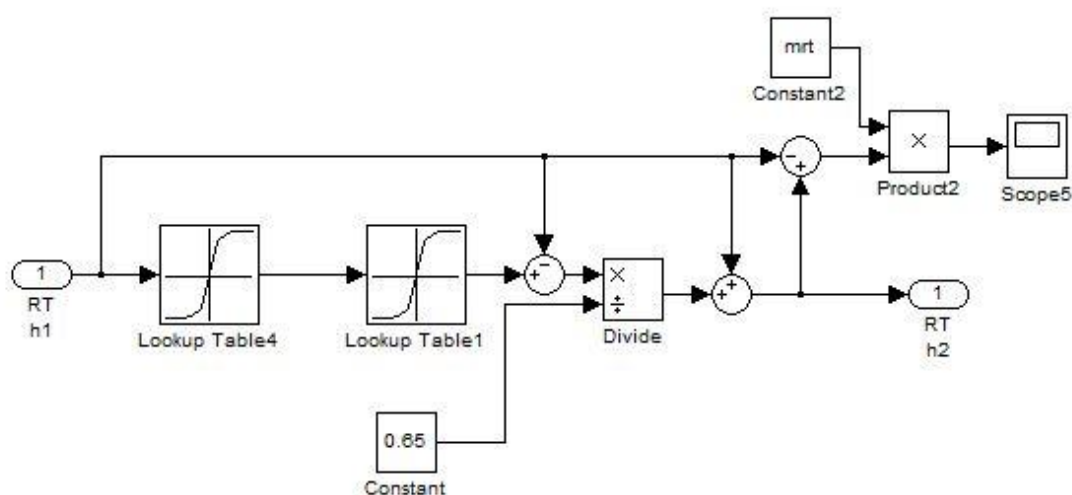
**Slika 17. Modelska shema turbine ORC postrojenja**

Preko tabličnih funkcija [Slika 17.] određuje se stanje radne tvari na izlasku iz turbine i snaga koja je dobivena prolaskom radne tvari kroz turbinu.



**Slika 18. Modelska shema segmenta kondenzatora radne tvari**

Poput isparivača, u modelu kondenzatora se računa promjena entalpije radne tvari, do koje dolazi predavanjem topline struji rashladne vode čija su svojstva definirana, te se preko tablične funkcije dobije promjena temperature radne tvari. [Slika 18.]



**Slika 19. Modelska shema cirkulacijske pumpe ORC postrojenja**

Kao i kod turbine, stanje radne tvari na izlasku iz pumpe, tj. ulasku u isparivač se određuje preko tabličnih funkcija [Slika 19.]. U ovom se bloku također određuje snaga pumpe potrebna za dizanje tlaka radne tvari s tlaka kondenzacije na tlak isparavanja.

## 6. REZULTATI SIMULACIJE

Simulacija je provedena za četiri poremećaja:

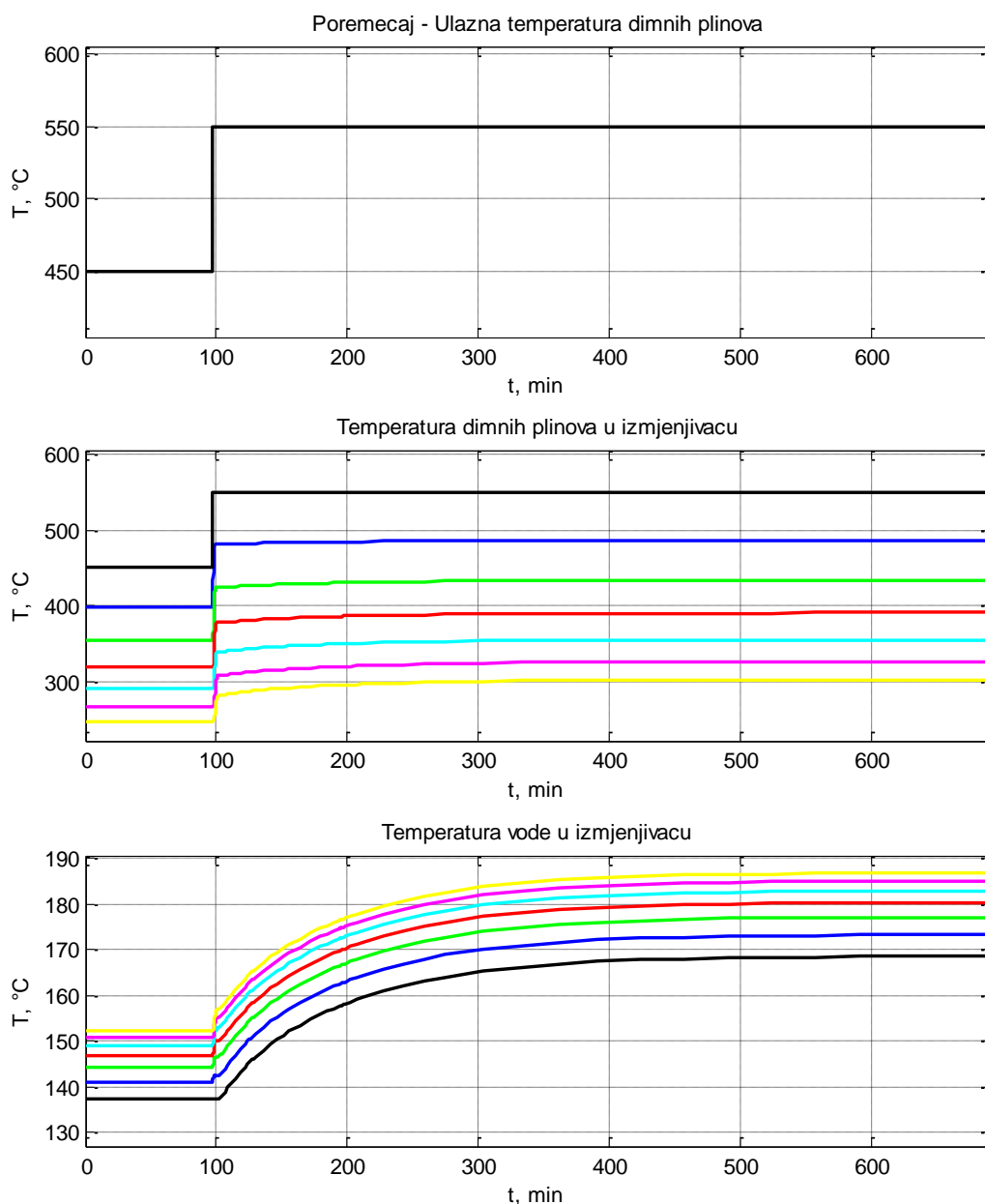
1. Porast ulazne temperature dimnih plinova od 100°
2. Pad ulazne temperature dimnih plinova od 100°C
3. Porast masenog protoka dimnih plinova od 50%
4. Pad masenog protoka dimnih plinova od 50%

Prikazani rezultati simulacije će obuhvatiti promjene parametara u komponentama postrojenja. Unutar izmjenjivača topline dimni plinovi/voda će se pratiti promjena temperature dimnih plinova i promjene temperatura vode u izmjenjivaču topline dimni plinovi/voda. Unutar isparivača radne tvari će se pratiti promjena temperature vode, promjena temperature i entalpije radne tvari, te promjenu sadržaja pare. Unutar kondenzatora radne tvari će se pratiti promjena temperature i entalpije radne tvari, promjena sadržaja pare i promjena temperature rashladne vode.

### 6.1. Porast ulazne temperature dimnih plinova od 100°C

Nakon naglog skoka ulazne temperature dimnih plinova doći će do skoka temperature dimnih plinova po segmentima izmjenjivača. U početnim je segmentima skok puno veći, dok se u daljnjim segmentima ublažava i dolazi prijelazne pojave polaganog rasta temperature do postizanja novog stacionarnog stanja zbog utjecaja promjene temperature vode u izmjenjivaču na količinu izmijenjene topline. Inicijalni skok temperature u početnim segmentima je manji nego u kasnijim segmentima zbog sporije promjene ulazne temperature vode koja ovisi o drugim komponentama postrojenja. Također, potrebno je duže vremena da struja vode postigne novo stacionarno stanje zbog utjecaja izmjene topline u isparivaču na temperaturu vode. [Slika 20.]

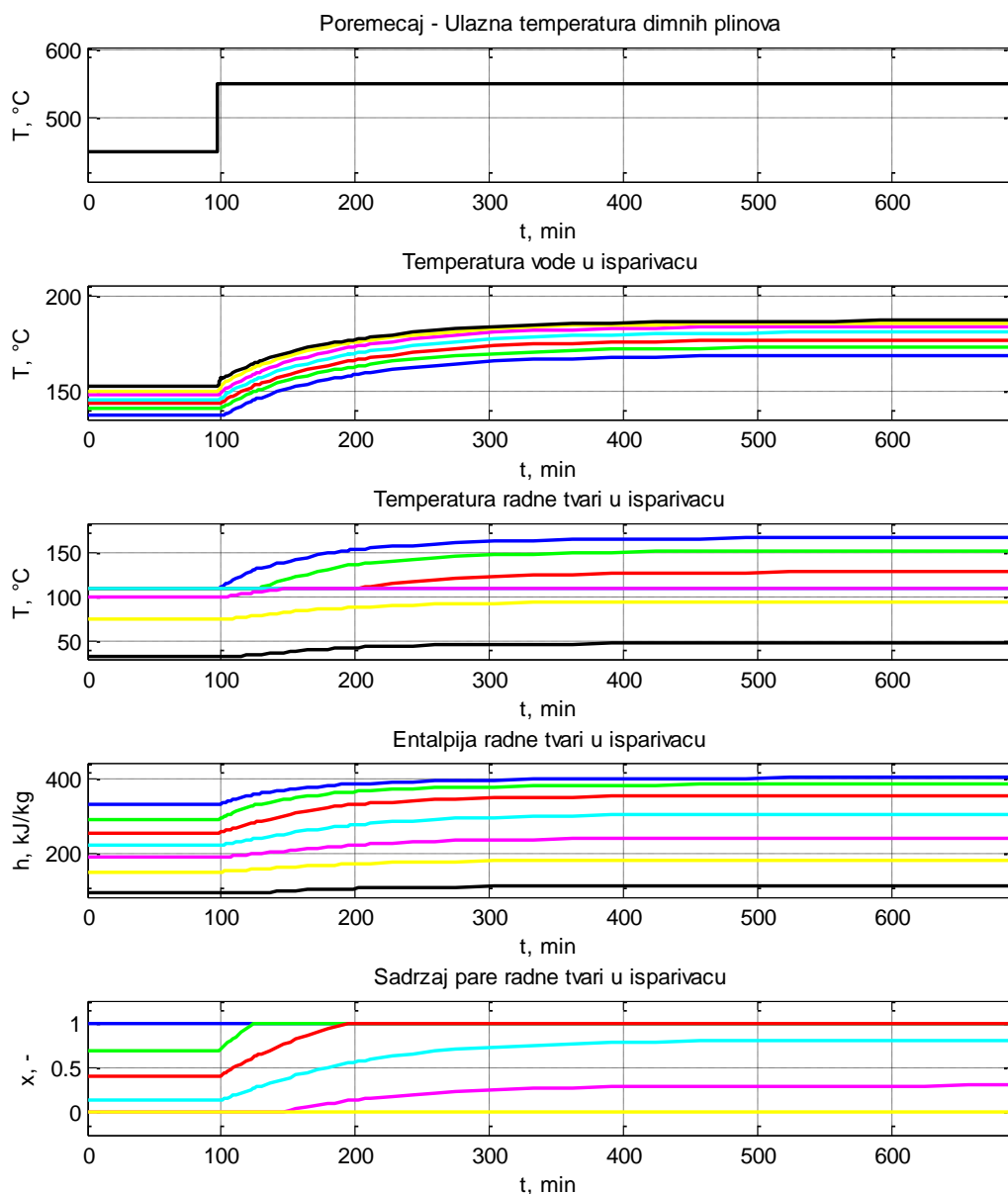




**Slika 20. Promjena parametara izmjenjivača (poremećaj 1)**

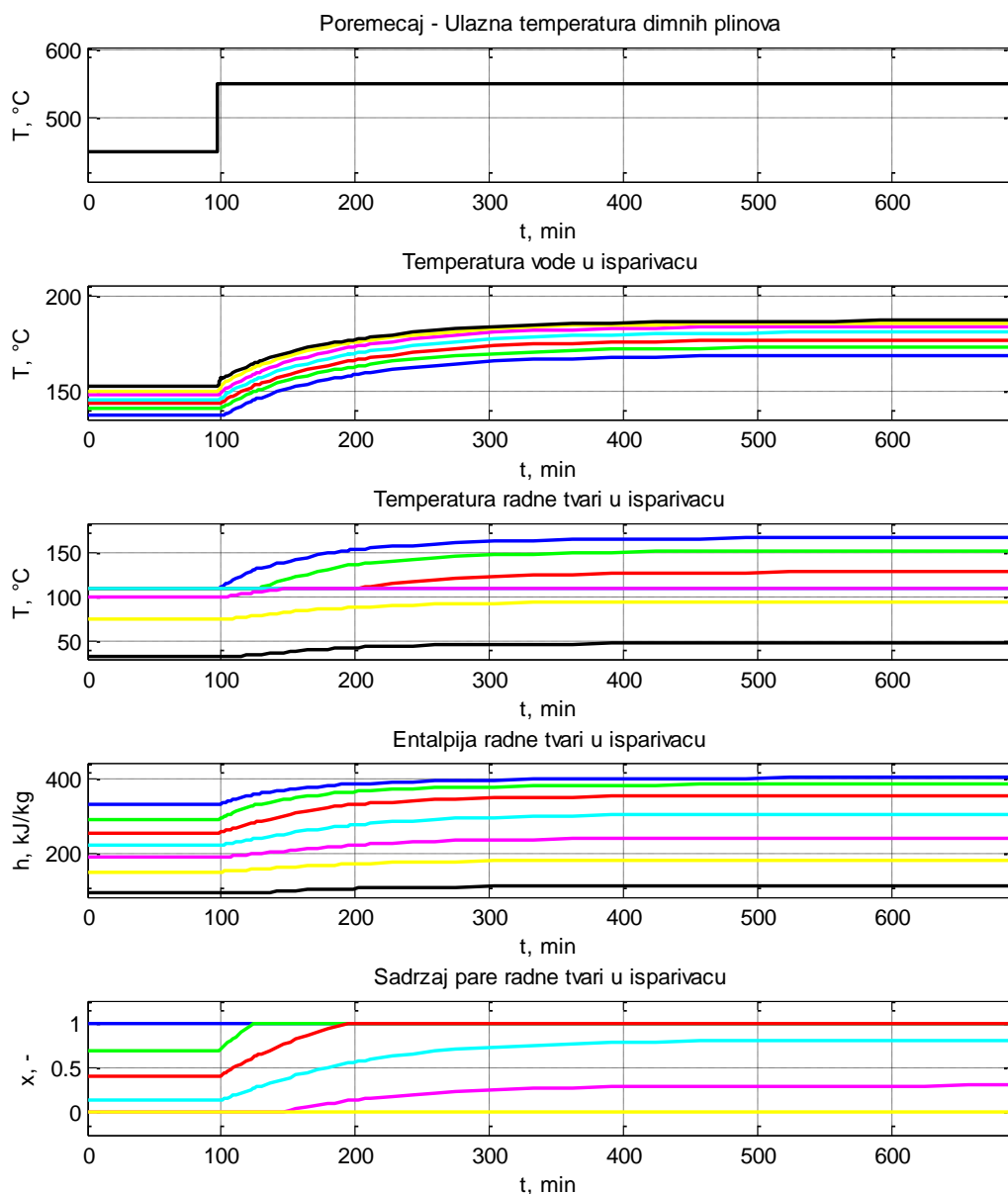
Uslijed promjene temperature vode u izmjenjivaču dimni plinovi/voda, doći će i do promjene temperature vode unutar isparivača. Početni skok temperature na ulazu u isparivač se prolaskom vode kroz segmente isparivača ublažava uslijed prijenosa topline na stijenku, te se postiže novo stacionarno stanje. Temperature radne tvari u početnom stanju je konstantna u zadnja četiri segmenta zbog toga što se radna tvar nalazi u zasićenom području. Porastom temperature vode dolazi i do rasta temperature radne tvari, tj. dolazi do pregrijanja radne tvari

u zadnja tri segmenta isparivača, dok radna tvar u drugom segmentu prelazi iz stanja pothlađene kapljevine u zasićeno područje. Na dijagramu promjene sadržaja pare radne tvari je vidljivo kako dolazi do povećanja udjela pare u krajnjim u svim segmentima isparivača osim prvog segmenta kroz koji nastavlja strujati pothlađena kapljevina, iako na sada nešto višoj temperaturi. Na dijagramu se također može vidjeti kontinuirani porast entalpije radne tvari. [Slika 21.]

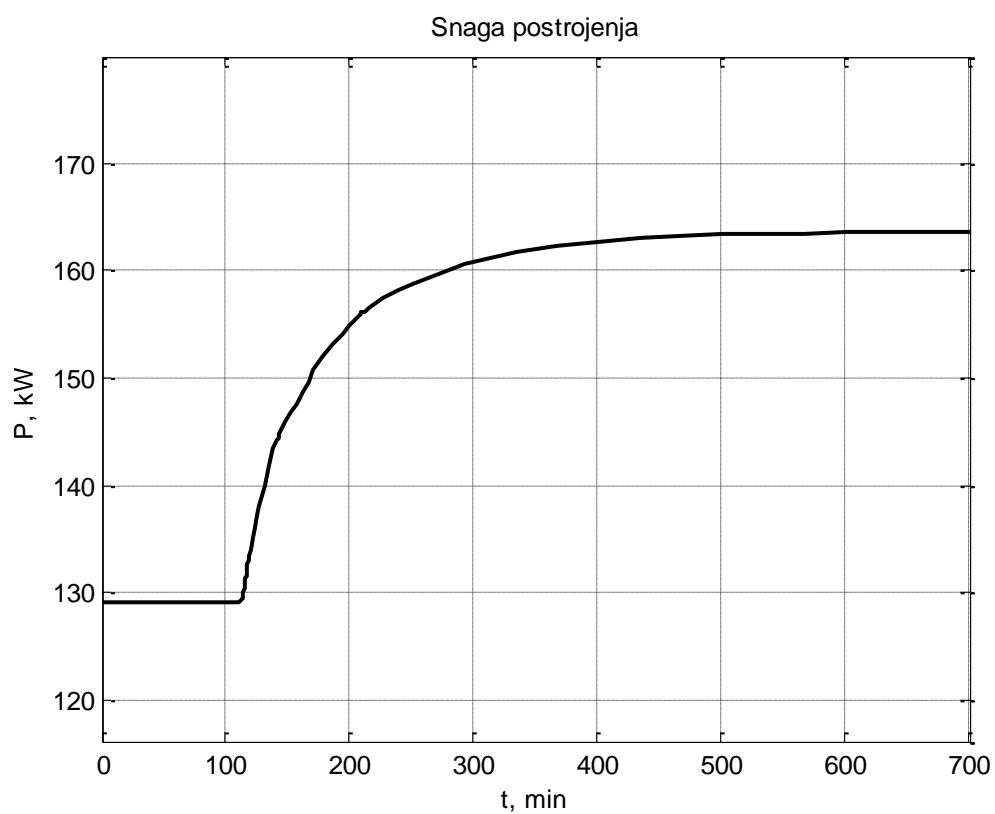


**Slika 21. Promjena parametara isparivača (poremećaj 1)**

Porast temperature radne tvari na izlasku iz isparivača rezultirati će porastom temperature radne tvari na ulazu u kondenzator, što će pak rezultirati porastom sadržaja pare na izlasku iz kondenzatora, tj. pare radne tvari neće u potpunosti kondenzirati. Zbog toga što se proces u većini segmenata kondenzatora odvija u zasićenom području neće doći do promjene temperature na izlasku iz kondenzatora, ali će zato radna tvar imati veću entalpiju na izlasku iz kondenzatora kao što se može vidjeti iz dijagrama. [Slika 22.]



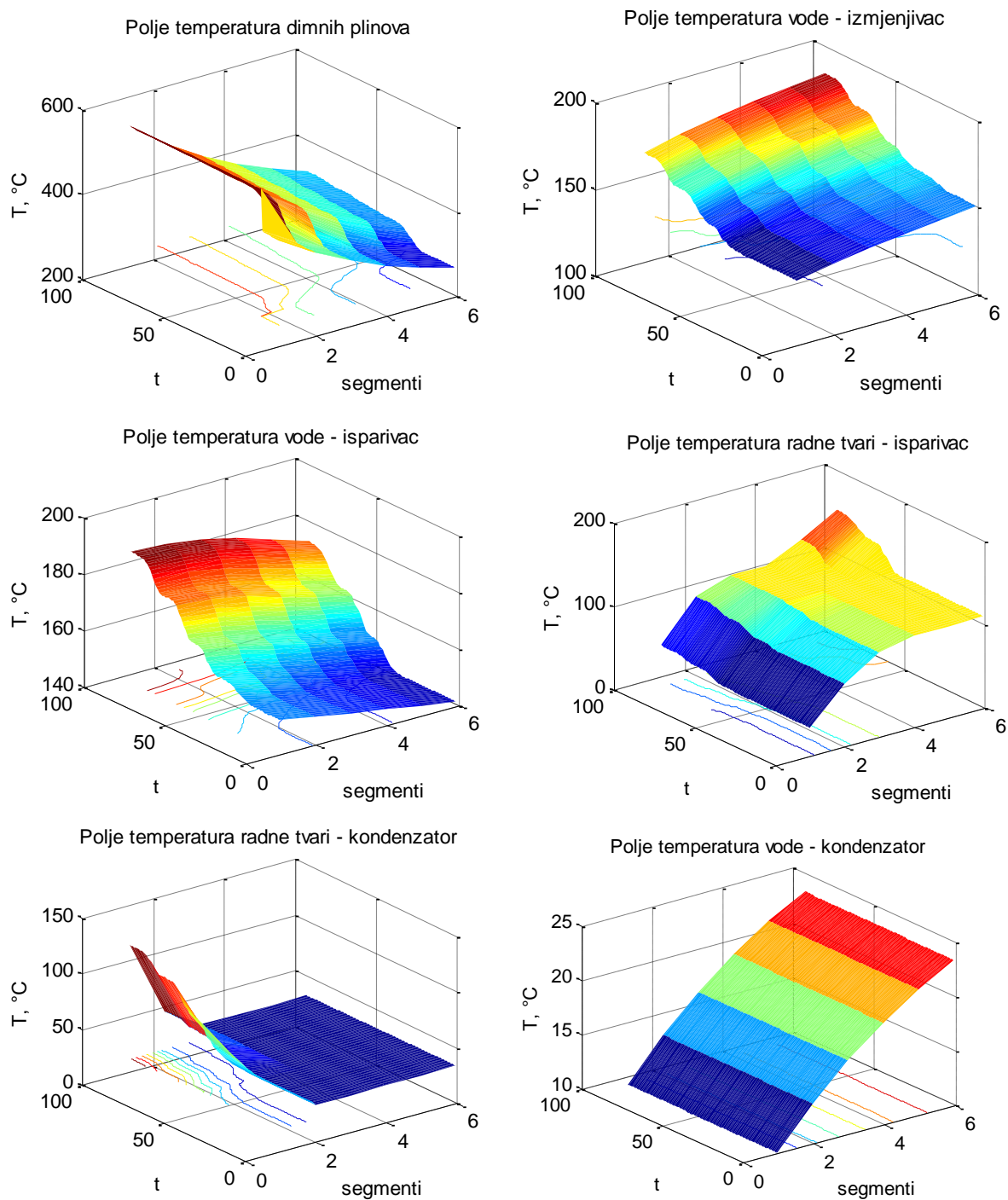
**Slika 22. Promjene parametara kondenzatora (poremećaj 1)**



**Slika 23. Promjena snage postrojenja (poremećaj 1)**

Kao što je moguće i pretpostaviti, porastom temperature dimnih plinova doći će i do porasta snage ORC postrojenja.

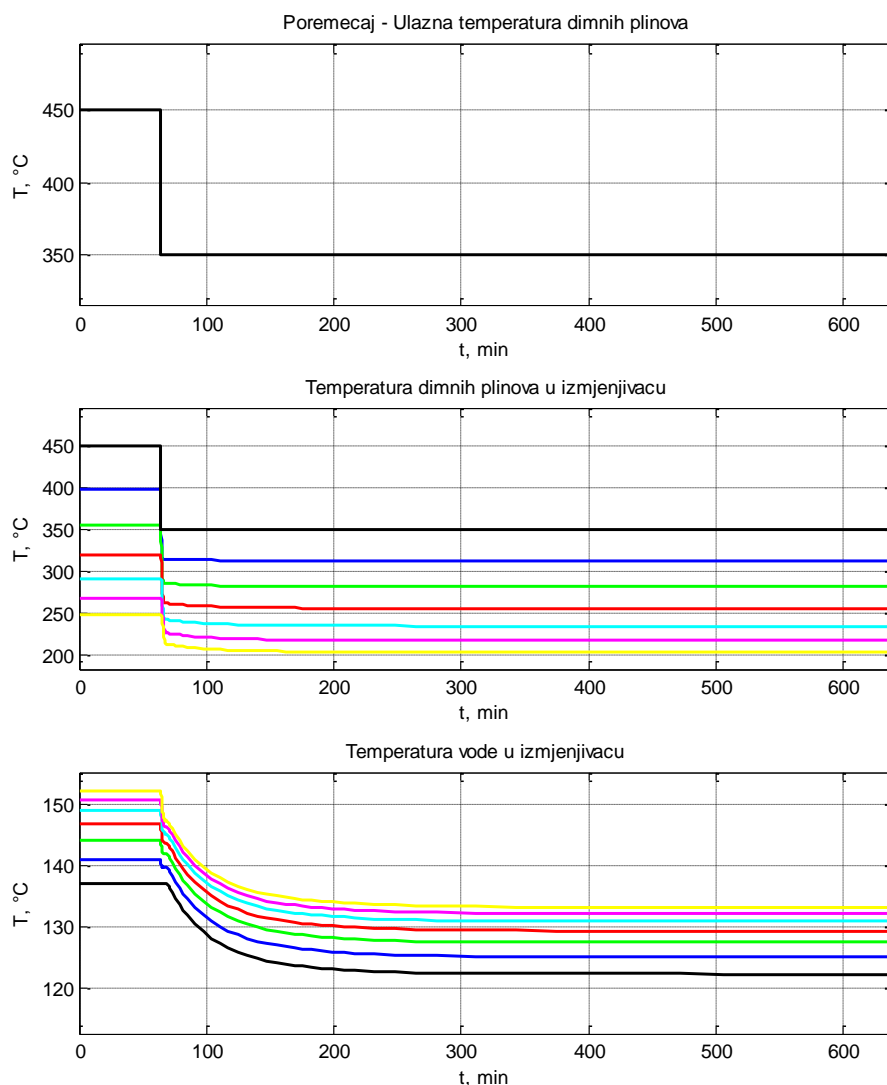
Polja temperature u komponentama ORC postrojenja su prikazana na sljedećim slikama.



**Slika 24. Temperaturna polja (poremećaj 1)**

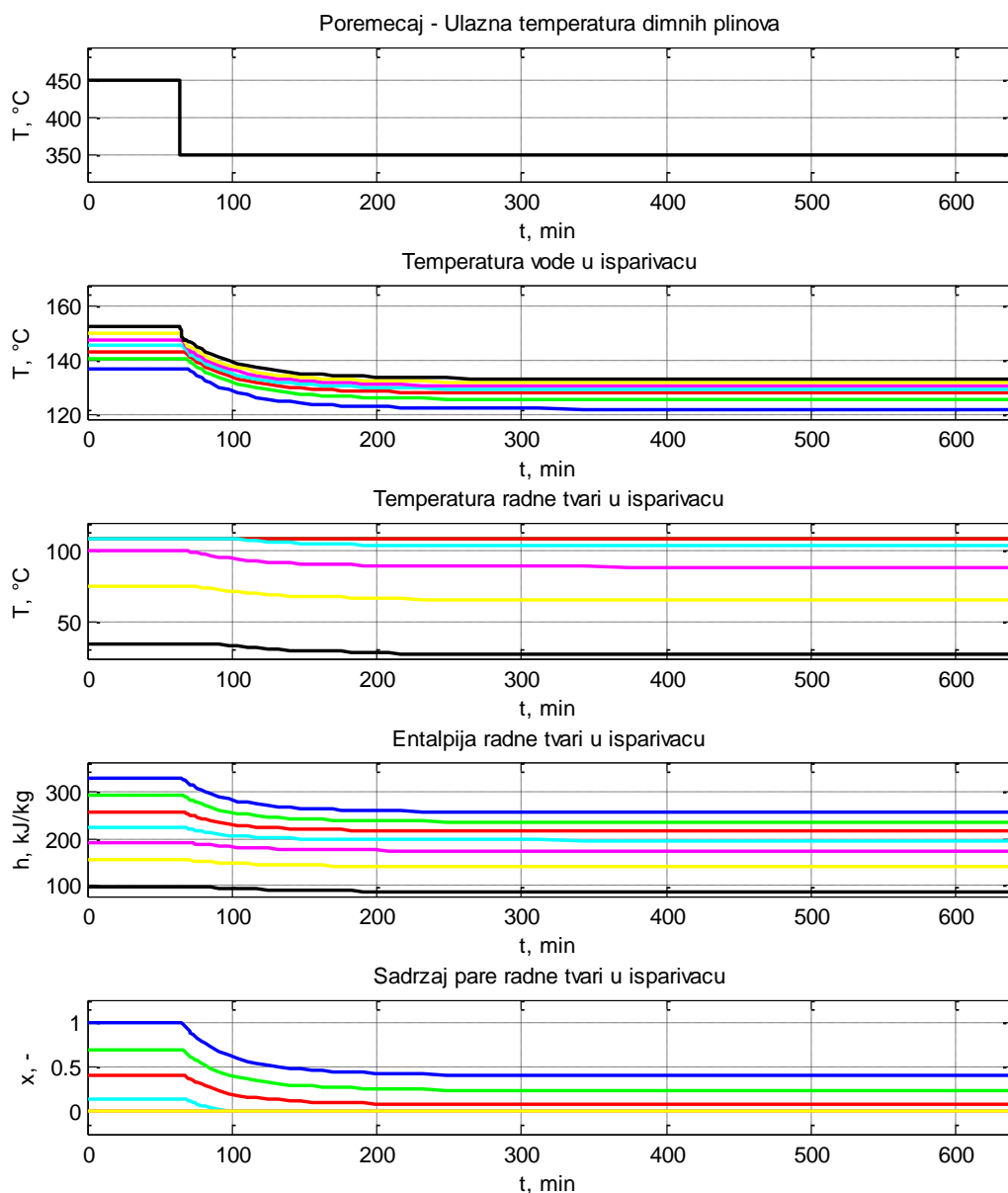
## 6.2. Pad ulazne temperature dimnih plinova od 100°C

Obrnuto proporcionalno prethodnom slučaju, kod pada ulazne temperature dimnih plinova za 100°C doći će do pada temperature dimnih plinova po segmentima i pada temperature vode po segmentima. U početnim segmentima izmjenjivača dimni plinovi će imati nagli pad koji se smanjuje prolaskom kroz segmente zbog utjecaja promjene temperature vode na tok dimnih plinova. Najizraženija promjena temperature vode u izmjenjivaču je na njenom izlasku. Zbog utjecaja izmjene topline s radnom tvari u isparivaču, promjena ulazne temperature vode neće doživjeti nagli pad kao što je pojava u kasnijim segmentima. [Slika 25.]



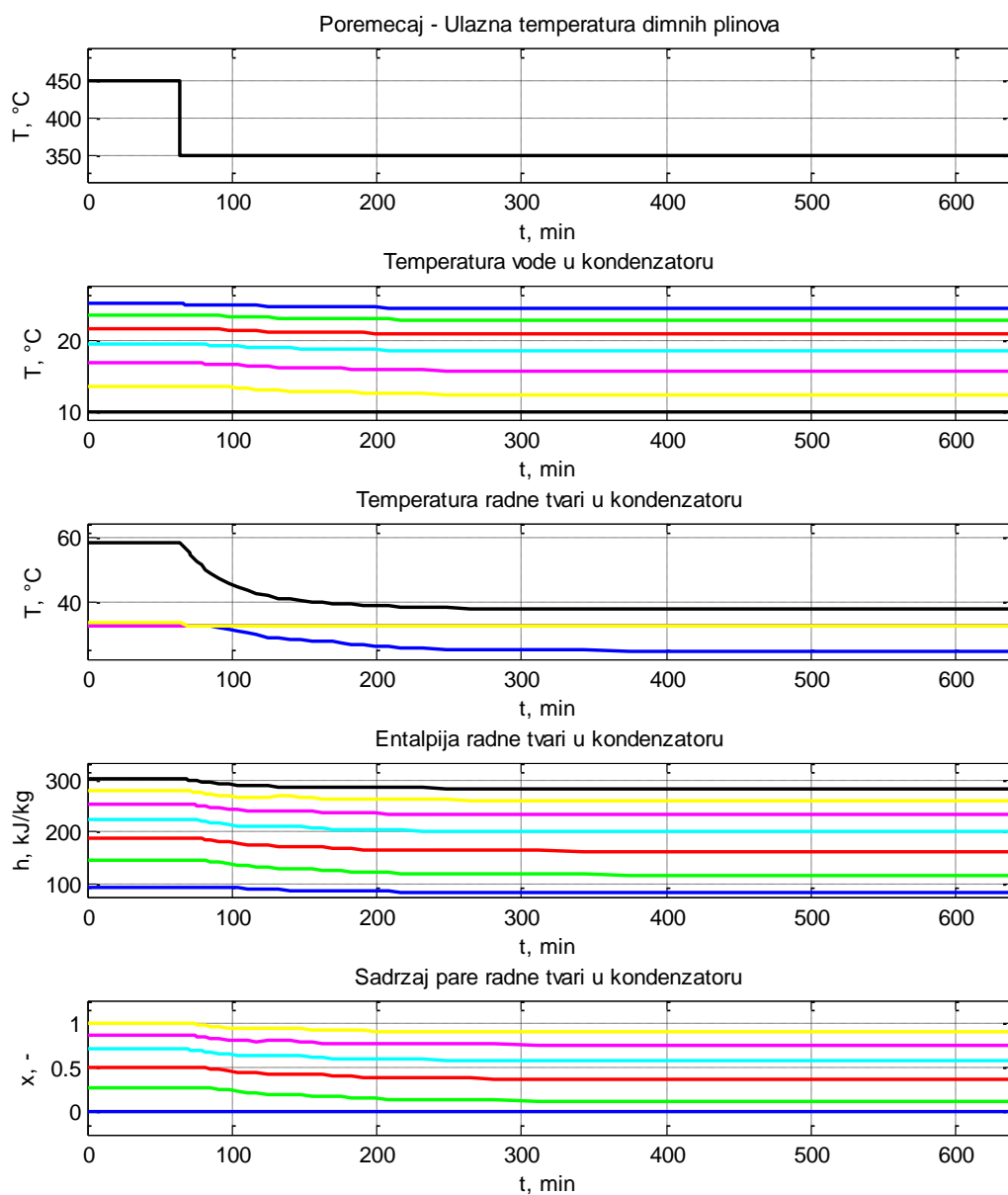
Slika 25. Promjena parametara izmjenjivača (poremećaj 2)

Zbog pada temperature vode u izmjenjivaču, dolazi i do pada temperature vode u isparivaču. Pad temperature vode u isparivaču rezultira smanjenim toplinskim tokom između struje vode i cijevne stijenke, te samim time i između cijevne stijenke i radne tvari. Krajnji rezultat je niža entalpije radne tvari na izlazu iz isparivača, tj. iz isparivača više ne izlazi suhozasićena para nego vlažna para, kao što je vidljivo na dijagramu udjela pare radne tvari u isparivaču. [Slika 26.]



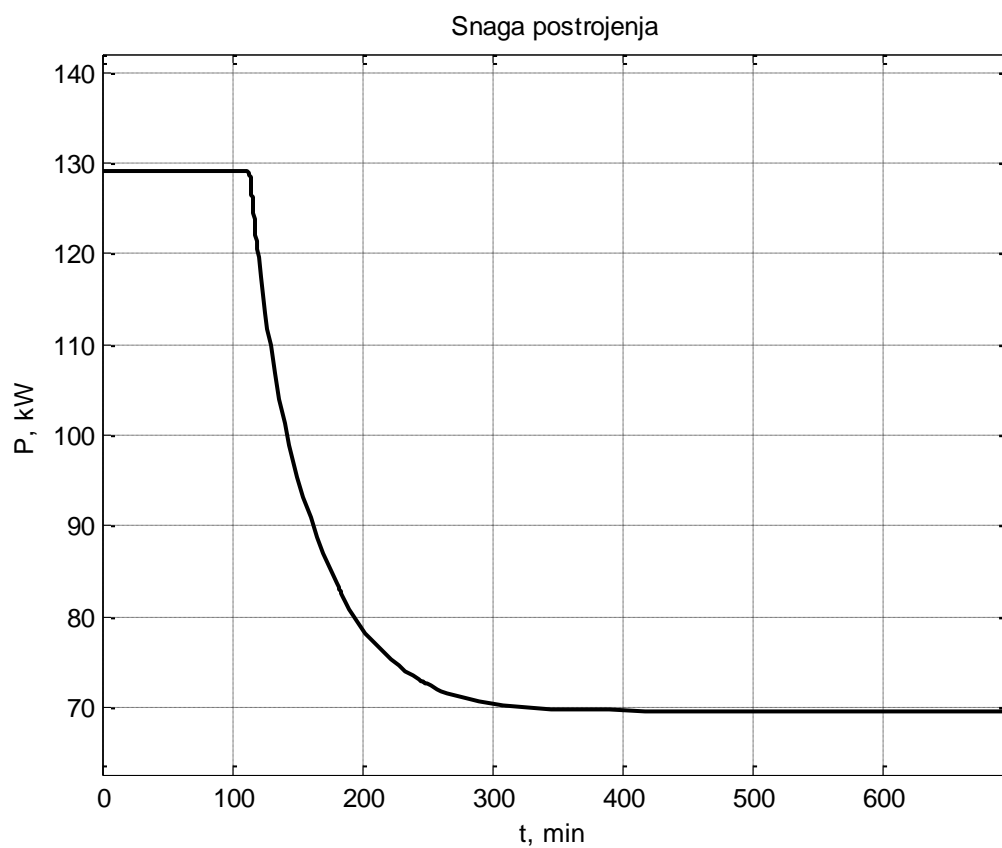
**Slika 26. Promjena parametara isparivača (poremećaj 2)**

Pad temperature radne tvari ne izlazu iz isparivača rezultira padom temeperature radne tvari u kondenzatoru i nižom temperaturom radne tvari na izlasku iz kondenzatora. To znači da iz kondenzatora više ne izlazi vrela kapljevina nego pothlađena kapljevina. [Slika 27.]



**Slika 27. Promjena parametara kondenzatora (poremećaj 2)**

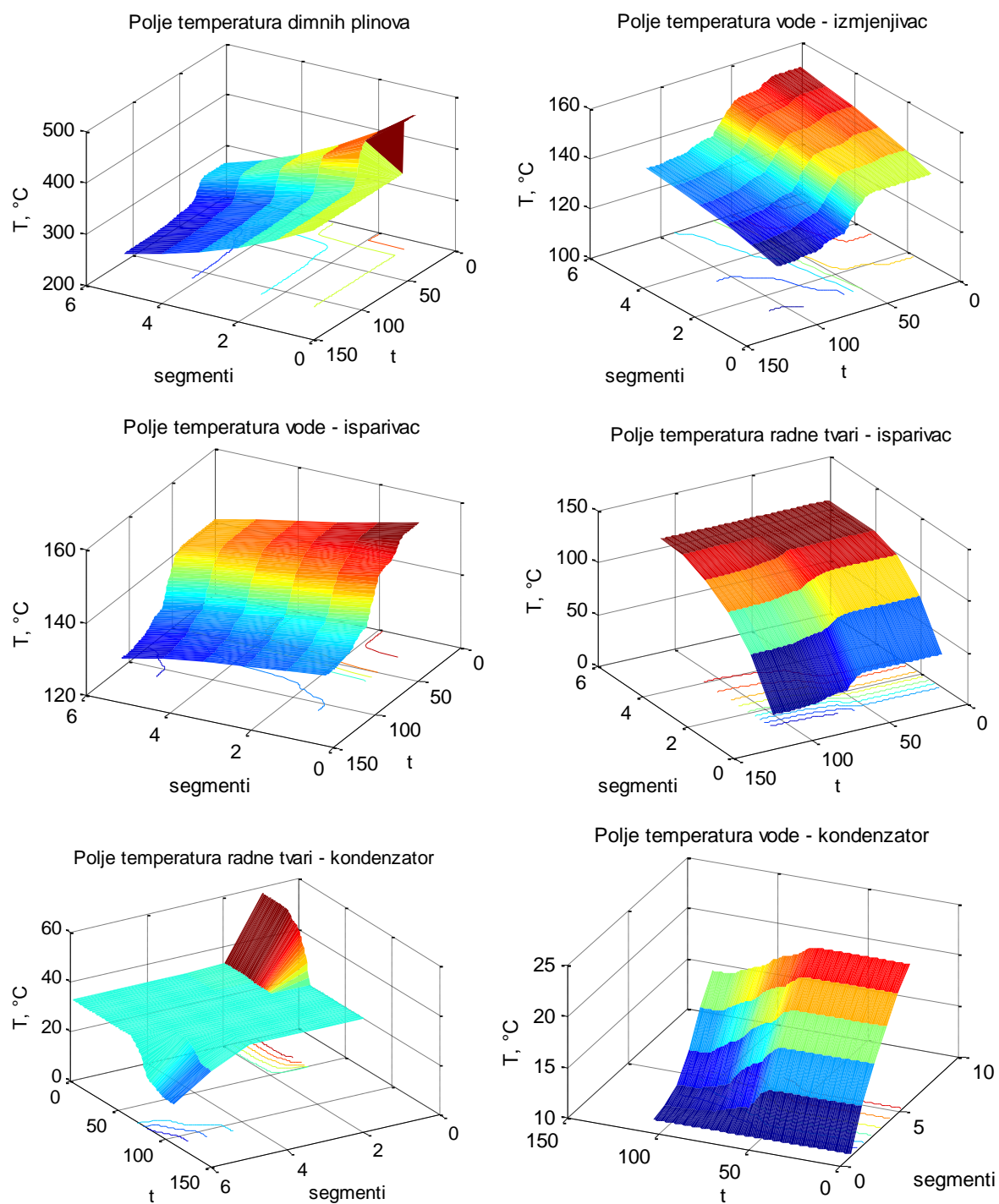




**Slika 28. Promjena snage postrojenja (poremećaj 2)**

Obrnuto proporcionalno porastu temperature dimnih plinova, koda pada temperature dimnih plinova dolazi i do pada snage postrojenja.

Temperaturna polja unutar komponenata ORC postrojenja prikazana su na sljedećim slikama.

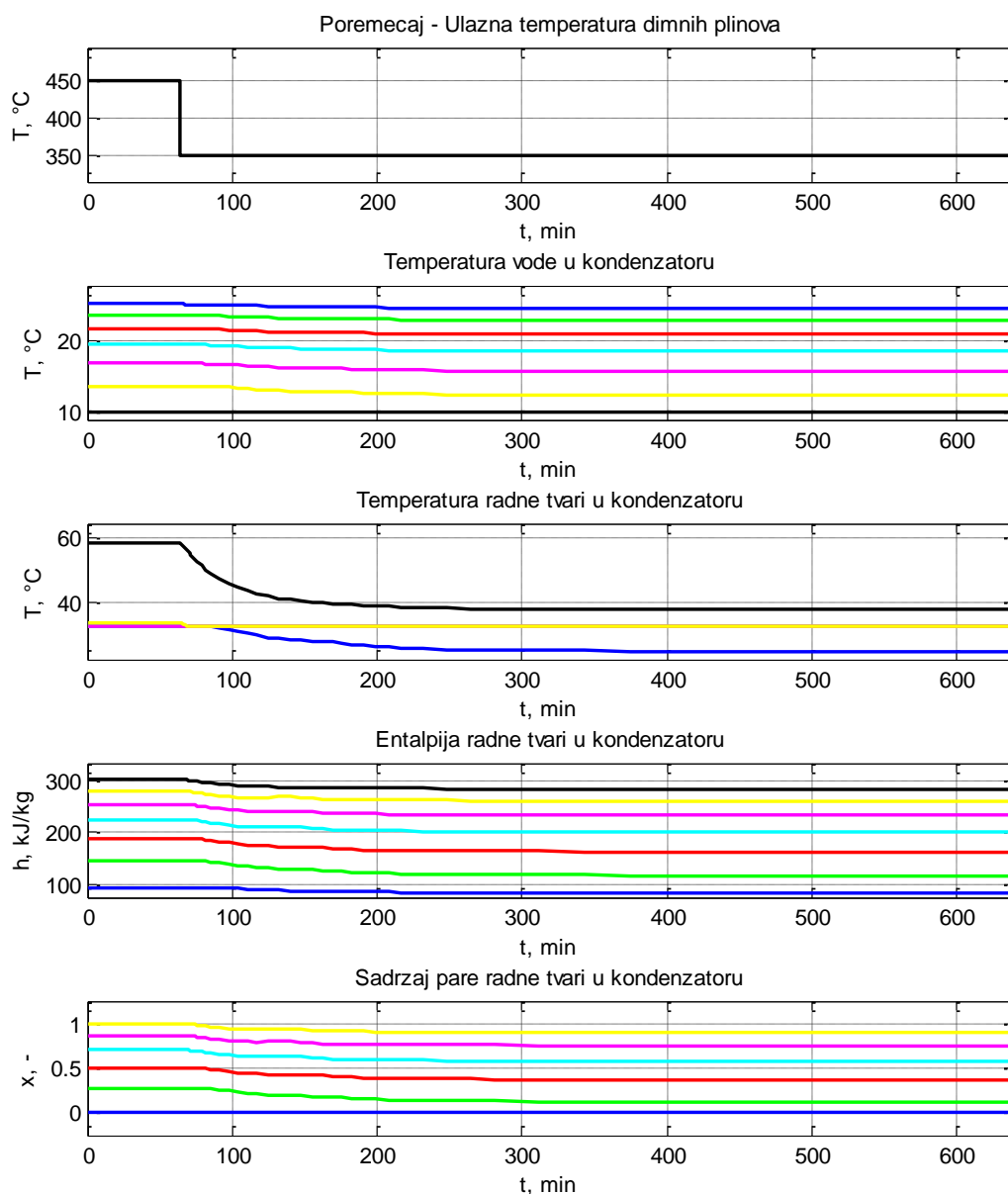


Slika 29. Temperaturna polja (poremećaj 2)

### 6.3. Porast masenog protoka dimnih plinova od 50%

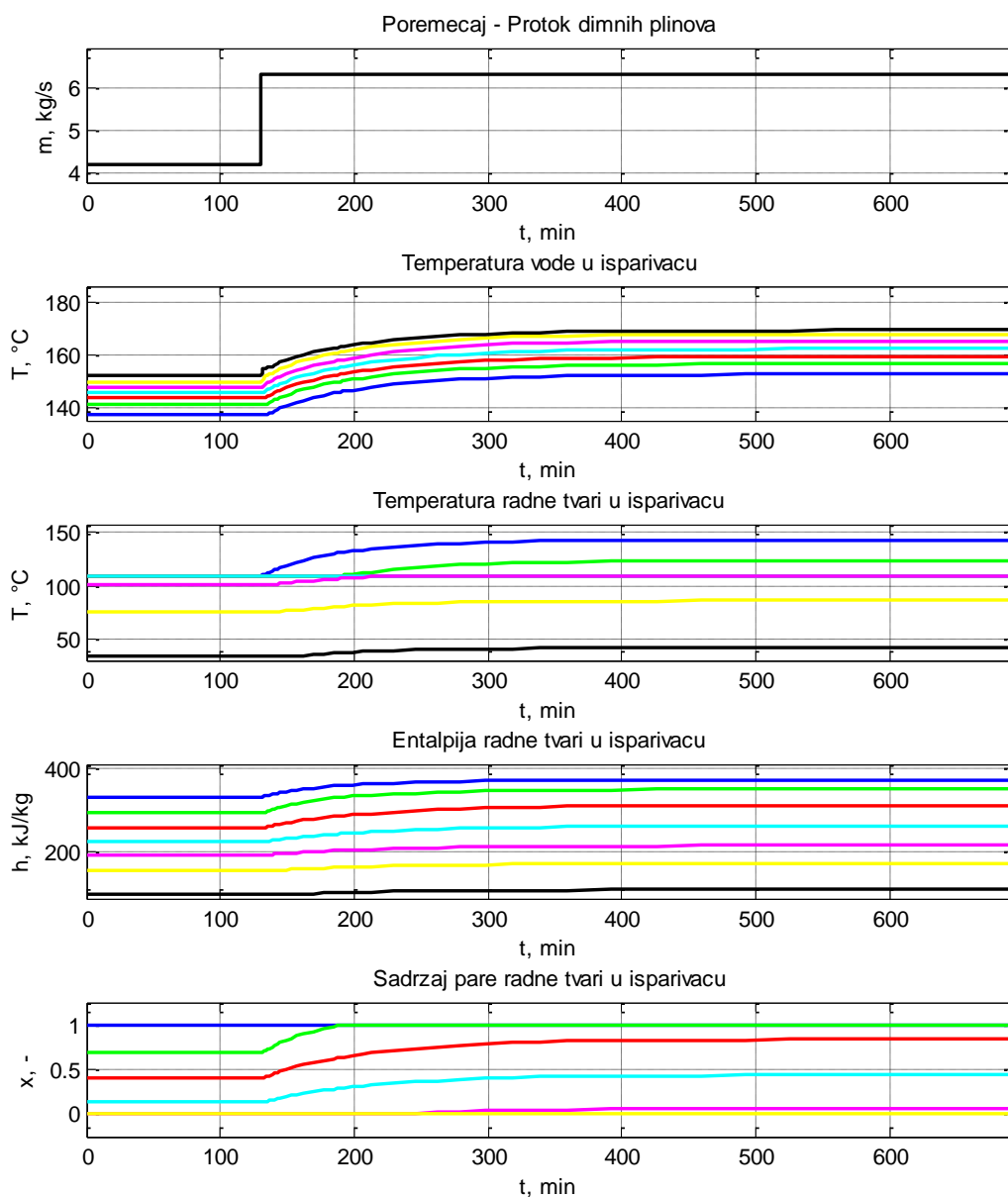
Porast masenog protoka dimnih plinova rezultira postepenim povećanjem temperature dimnih plinova po segmentima, što pak dovodi do povećanja temperature vode u izmjenjivaču.

[Slika 30.]



Slika 30. Promjena parametara izmjenjivača (poremećaj 3)

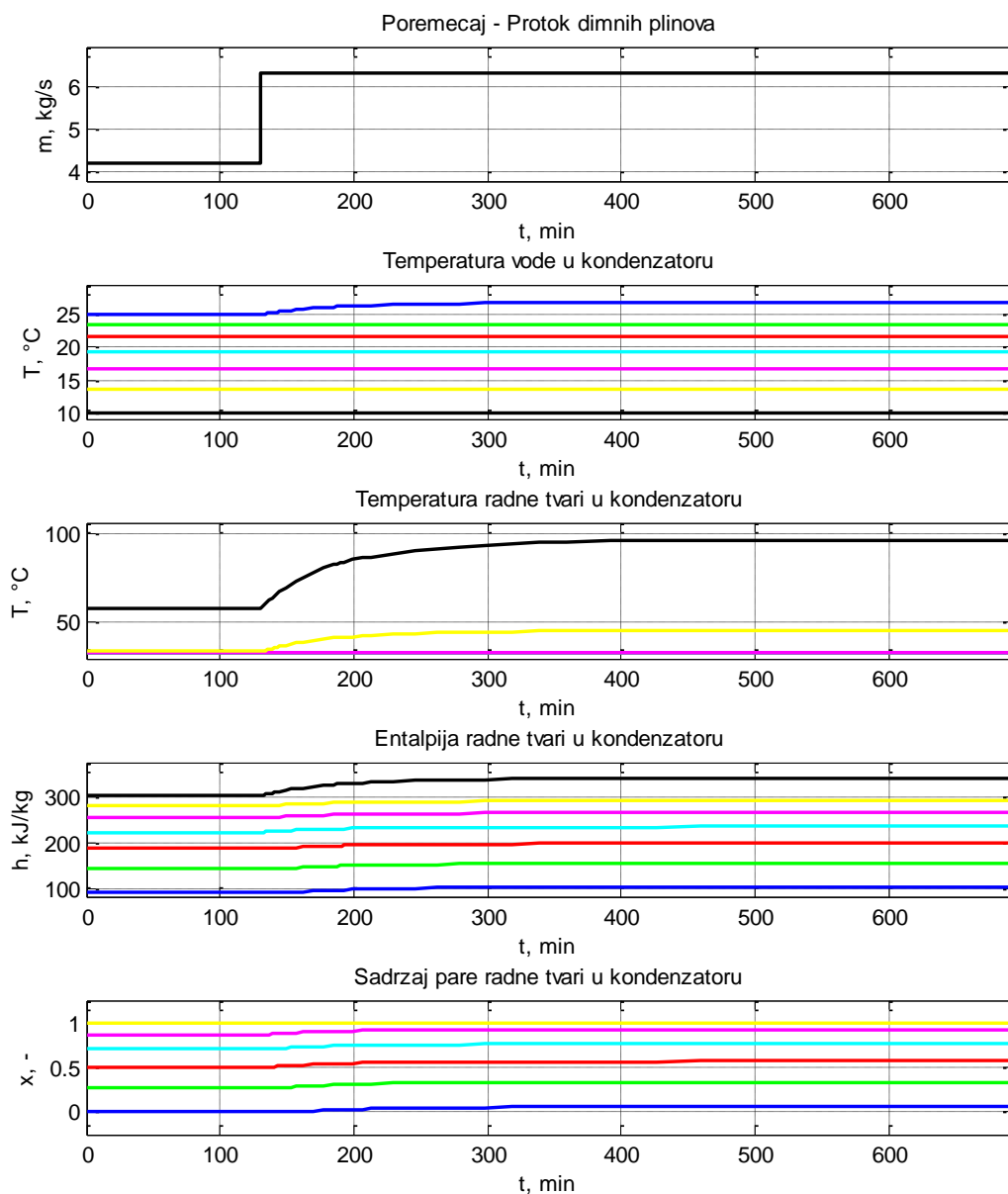
Porast temperature vode rezultira porastom temperature radne tvari u isparivaču i izlaskom pregrijane pare iz isparivača. Također je vidljivo da dolazi do povećanja udjela pare po segmentima. [Slika 31.]



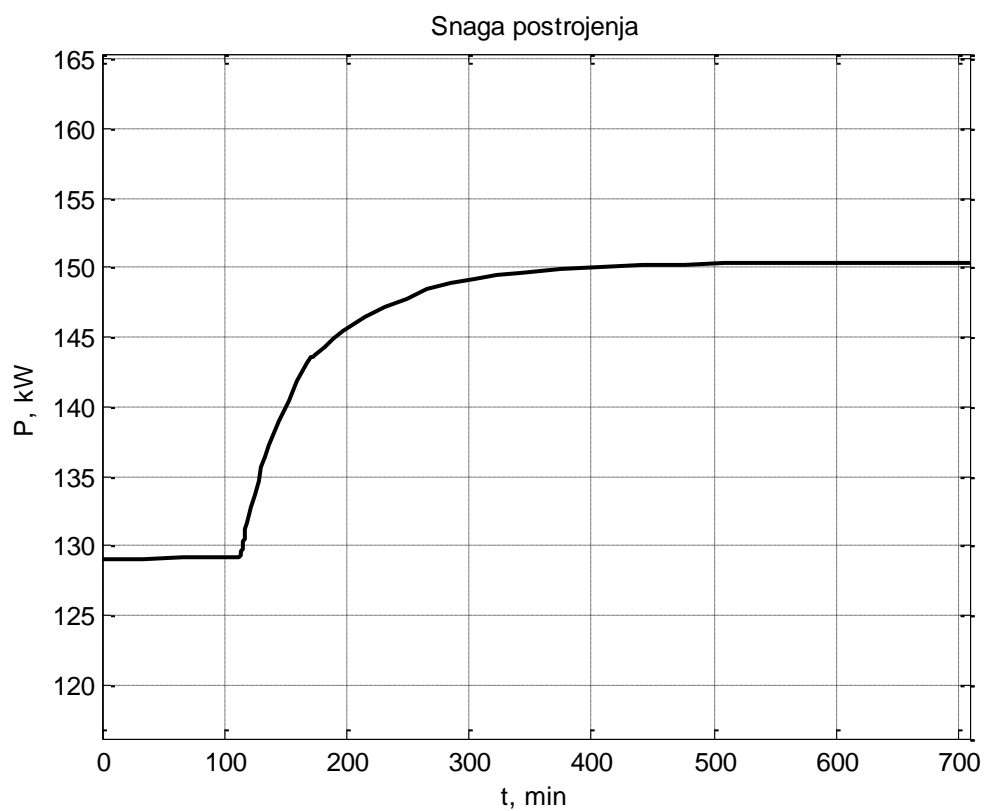
**Slika 31. Promjena parametara isparivača (poremećaj 3)**

Viša temperatura radne tvari na izlasku iz isparivača rezultira većim udjelom pare na izlasku iz kondenzatora, te općeniti porastom entalpije i sadržaja pare po segmentima kondenzatora.

[Slika 32.]



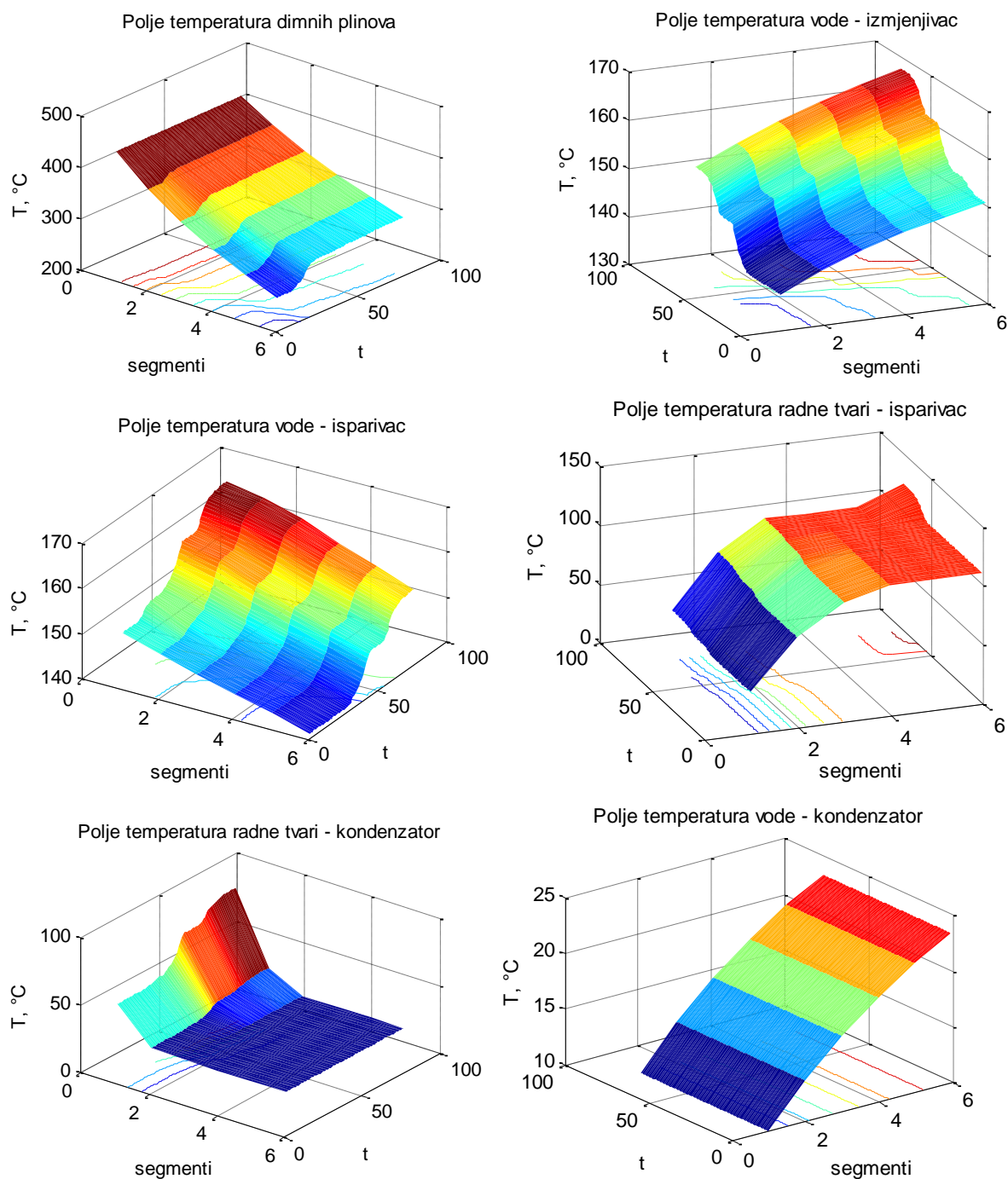
**Slika 32. Promjena parametara kondenzatora (poremećaj 3)**



**Slika 33. Promjena snage postrojenja (poremećaj 3)**

Povećanjem masenog protoka dimnih plinova dolazi do povećanja snage ORC postrojenja.

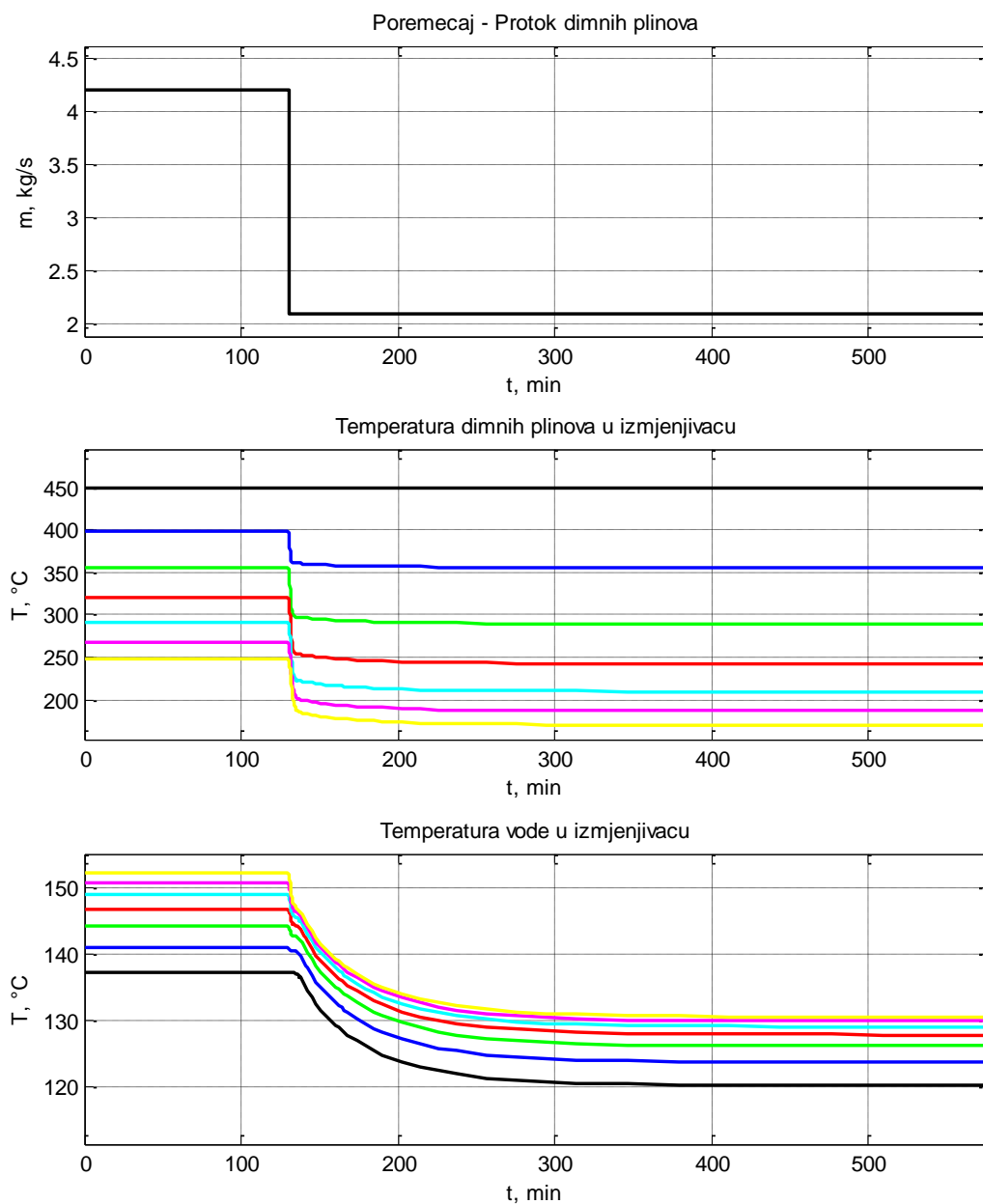
Na sljedećim su slikama prikazana temperaturna polja u komponentama ORC postrojenja.



**Slika 34. Temperaturna polja (poremećaj 3)**

#### 6.4. Pad masenog protoka dimnih plinova od 50%

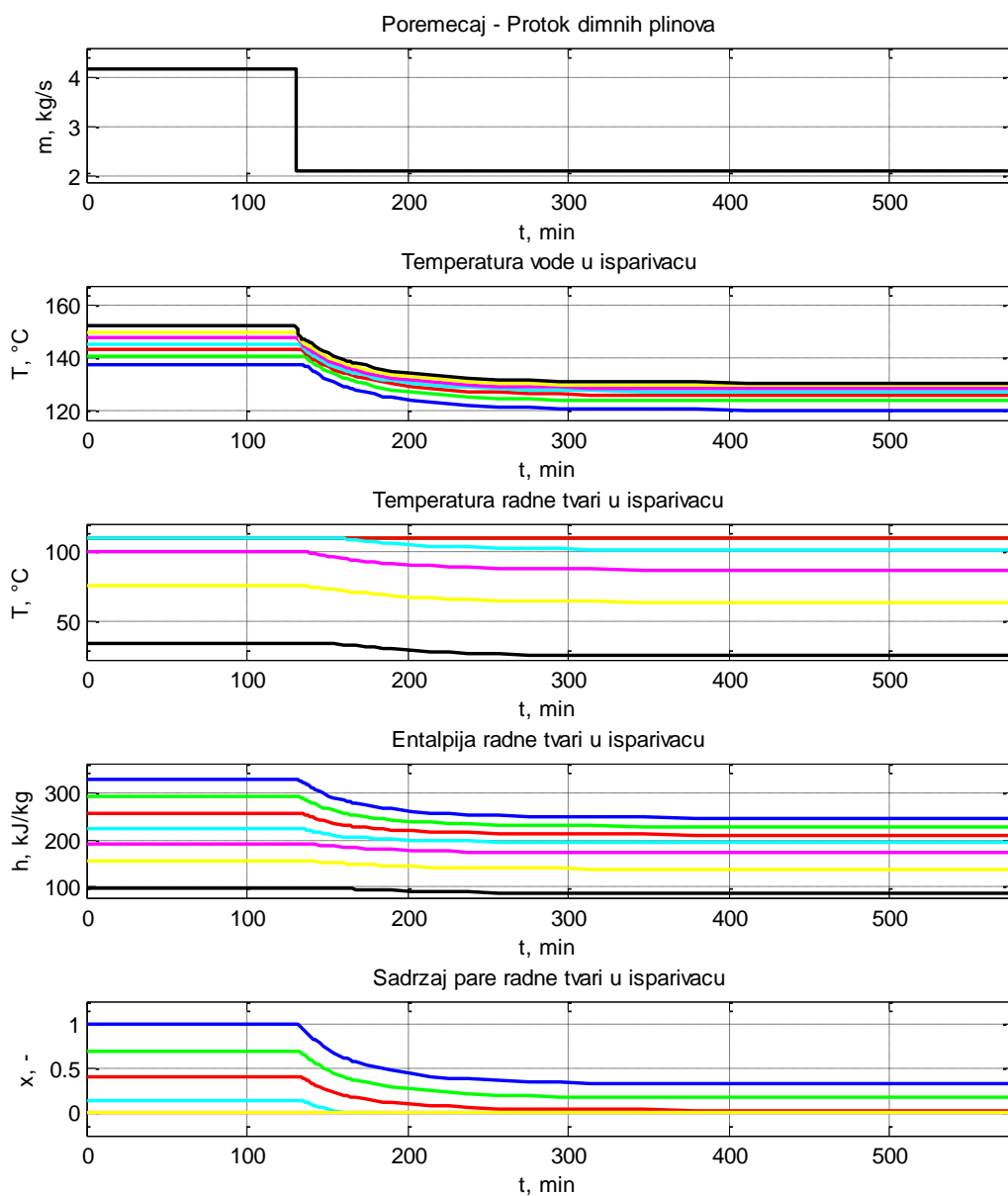
Pad masenog protoka dimnih plinova rezultira padom temperature dimnih plinova po segmentima te postepenim padom temperature vode u izmjenjivaču. [Slika 35.]



Slika 35. Promjena parametara izmjenjivača (poremećaj 4)

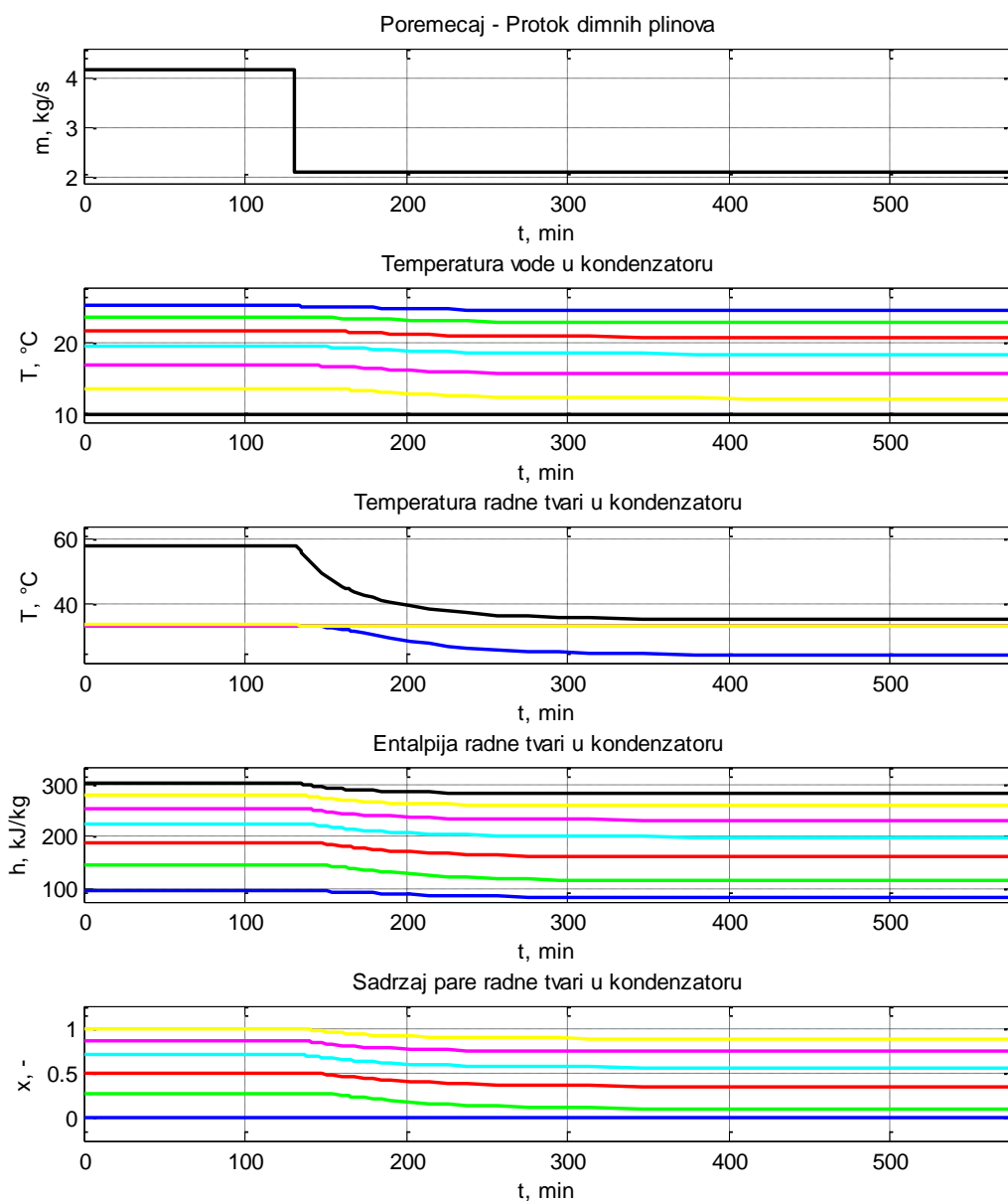


Pad temperature vode rezultira padom entalpije radne tvari u isparivaču. To znači da iz isparivača više ne izlazi suhozasićena para nego vlažna para. Pad udjela pare i pad entalpije po segmentima su vidljivi u dijagramima. [Slika 36.]

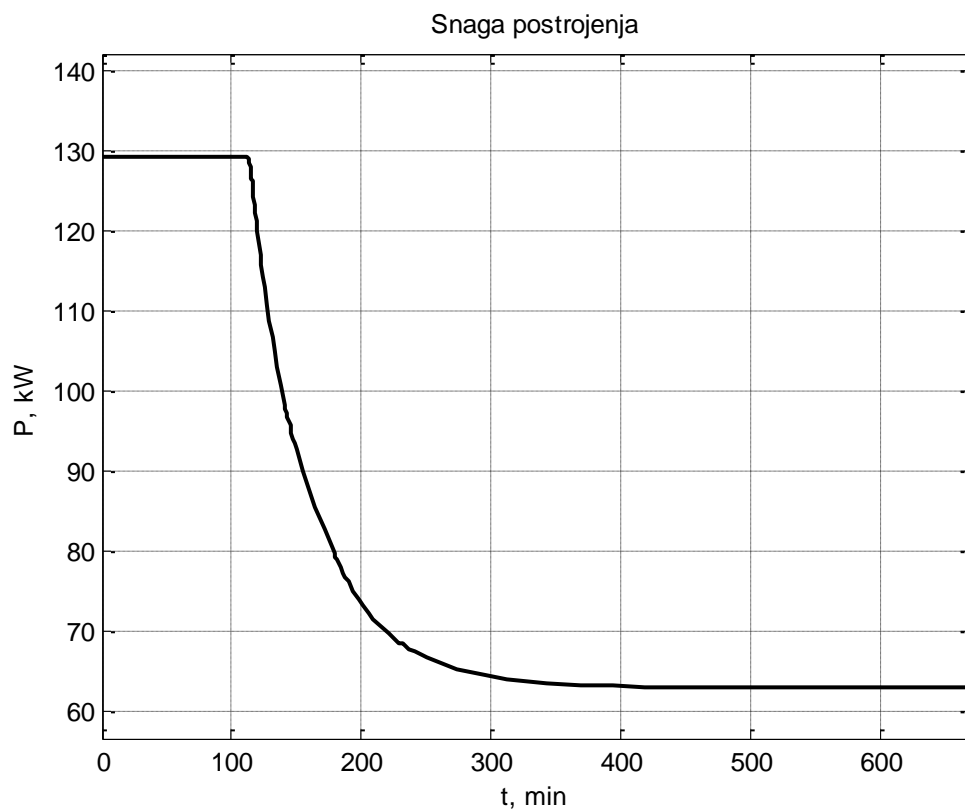


**Slika 36. Promjena parametara isparivača (poremećaj 4)**

Uslijeda pada entalpije radne tvari na izlasku iz isparivača, radna tvar ulazi u kondenzator s manjom radnom tvari od predviđene. S obzirom da temperaturna razlika između rashladnog medija i radne tvari u većini segmenata nije promijenjena (radna tvar se nalazi u zasićenom području), količina izmijenjene topline ostaje ista. Zbog toga će iz kondenzatora izlaziti pothlađena kapljevina umjesto vrele, kao što je i vidljivo na dijagramu. [Slika 37.]



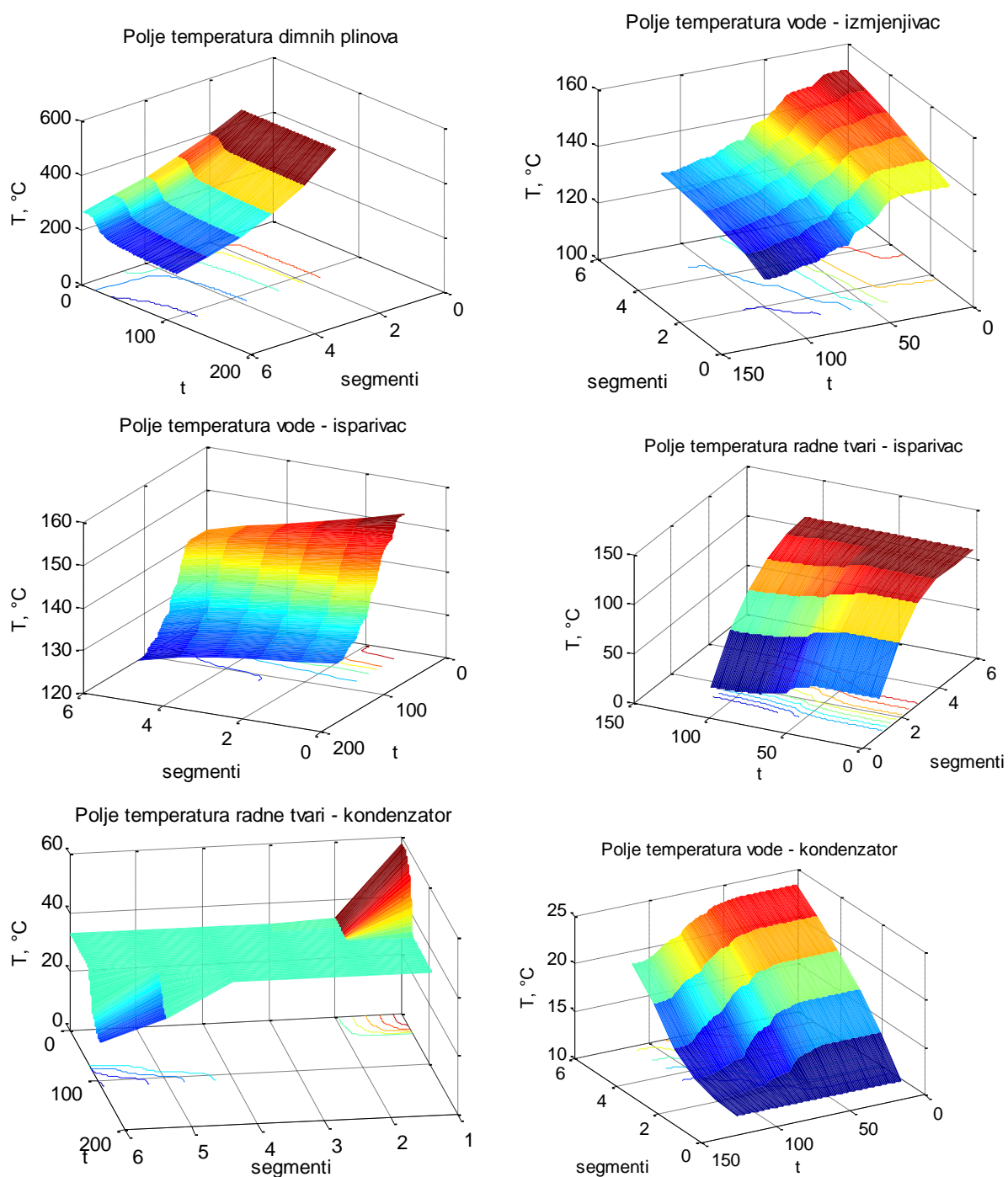
**Slika 37. Promjena parametara kondenzatora (poremećaj 4)**



**Slika 38. Promjena snage postrojenja (poremećaj 4)**

Uslijed pada protoka dimnih plinova dolazi do pada snage ORC postrojenja.

Na sljedećim su slikama prikazana temperaturna polja unutar komponenata ORC postrojenja.



**Slika 39. Temperaturna polja (poremećaj 4)**

Iz dobivenih je rezultata vidljiv utjecaj promjene stanja struje dimnih plinova na ulasku u izmjenjivač na rad ORC procesa. Ukoliko dođe do prevelikog promjene temperature dimnih plinova, a samim time i ogrjevnog medija ORC procesa, narušava se ravnoteža procesa i može doći do neželjenih pojava, kao što su ulazak vlažne pare u turbinu ili ulazak vlažne pare u pumpu, što može uzrokovati oštećenja opreme. Iz tog razloga je potrebna regulacija temperature ogrjevnog medija i protoka radne tvari kako bi se ostvario optimalan rad postrojenja.

## 7. ZAKLJUČAK

Zbog dvostruke prijetnje moguće nestašice fosilnih goriva u skoroj budućnosti i nepovoljnog utjecaja na okoliš uslijed prekomjernog korištenja fosilnog goriva, od velike je važnosti povećati iskoristivost korištenja fosilnih goriva i energije općenito.

U sklopu ovog rada dano je kratko objašnjenje što je ORC i koje su njegove prednosti. ORC koristi radnu tvar drugačiji svojstava od vode, tj. pomoću organskim medija moguće je iskoristiti topline znatno nižih vrijednosti. Bez obzira na nisku iskoristivog samog sustava, činjenica da koristi otpadnu toplinu nekog industrijskog procesa mu omogućava postizanje visoke ekonomske isplativosti.

Također u sklopu rada je proračunat i konstruiran izmjenjivač topline dimni plinovi/voda toplinske snage 1000 kW, koji služi za prijenos otpadne topline dimnih plinova iz bioplinskog motora na vodu koja funkcionira kao ogrjevnj medij ORC postrojenja.

Nakon definiranja konfiguracije postrojenja i provođenja termodinamičkog proračuna za postrojenje snage 125 kW, dobivena je iskoristivost od 12,19 %, što je prihvatljivo.

Za postavljanje matematičkog modela postrojenja uzete su neke pretpostavke koje pojednostavljaju problematiku kako bi se mogla postići ravnoteža između svih komponenata sustava izvesti simulacija. Simulacija se izvodila u *Simulink*-u kao što je i pokazano u radu. Simulacija je provedena za promjene protoka i temperature dimnih plinova i dobiveni su željeni odzivi.

Iz dobivenih rezultata je vidljivo da je nije potrebna velika promjena na strani dimnih plinova i ogrjevnog medija da bi se narušila ravnoteža unutar sustava i samim time smanjila efikasnost. Čak porasta temperature koji dovodi do porasta snage može imati neželjene posljedice. Ukoliko se para na izlazu iz isparivača prekomjerno pregrije, moguće je da neće kondenzirati u potpunosti u kondenzatoru te nakon toga ući u pumpu kao vlažna para i uzrokovati potencijalna oštećenja. Ako i uspije sva para kondenzirati, opet je dobar dio topline „bačen“ u okoliš, što je protivno namjeni ORC postrojenja.

ORC u kombinaciji sa industrijskim procesima koji izbacuju velike količine topline u okoliš i dobrom regulacijom temperature radne tvari može značajno povećati iskoristivost industrijskog procesa i samim time smanjiti potrošnju primarne energije.

## LITERATURA

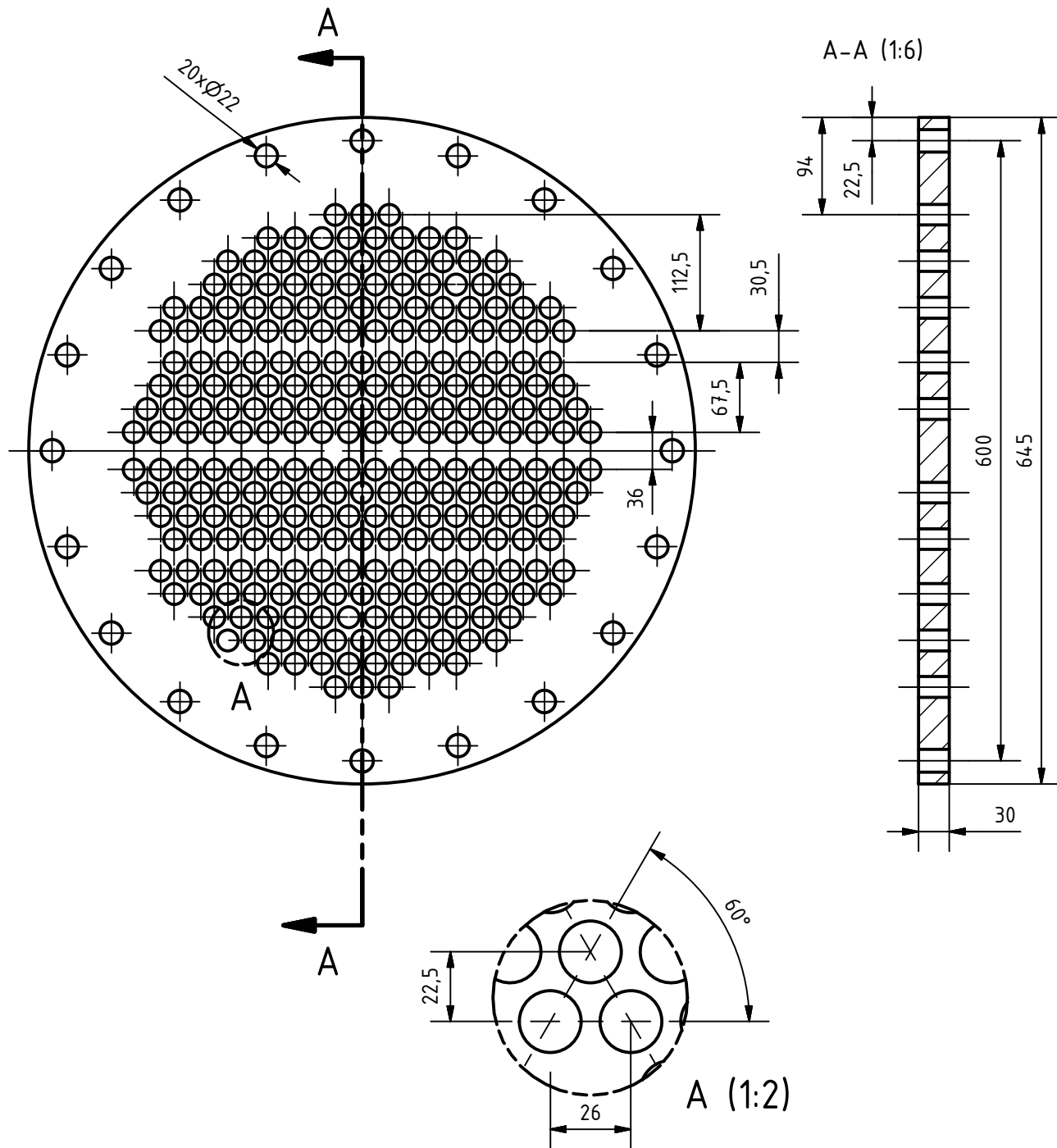
- [1] Quoilin, S.: The Organic Rankine Cycle: Thermodynamics, Applications and Optimizations, Energy Systems Research Unit, University of Liege, Belgija
- [2] Lončar, D., Krajačić, G., Vujanović, M.: Podrška developerima – Primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu', Zagreb, 2009.
- [3] [http://www.clim-wastener.eu/fichiersTinyMCE/ORC\\_Technical\\_Note.pdf](http://www.clim-wastener.eu/fichiersTinyMCE/ORC_Technical_Note.pdf)
- [4] [http://www.eihp.hr/hrvatski/pdf/Big\\_east\\_obuka/5\\_FITEC\\_Koristenje\\_bioplina.pdf](http://www.eihp.hr/hrvatski/pdf/Big_east_obuka/5_FITEC_Koristenje_bioplina.pdf)
- [5] Švaić, S., Boras, I.: Formule za izračunavanje koeficijenta prijelaza topline, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [6] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [7] [http://www.zetamec.com/din-2633-pn16\\_eng.htm](http://www.zetamec.com/din-2633-pn16_eng.htm)
- [8] Švaić, S.: Aparati i posude pod tlakom – podloge za rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [9] Kocijan, V.: Modeliranje i simulacija pogona ORC postrojenja, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [10] McMahan, A. C.: Design and Optimization of Organic Rankine Cycle Solar-Thermal Powerplants, Diplomski rad, University of Wisconsin – Madison, SAD, 2006.
- [11] <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
- [12] Galović, A.: Termodinamika I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [13] Galović, A.: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

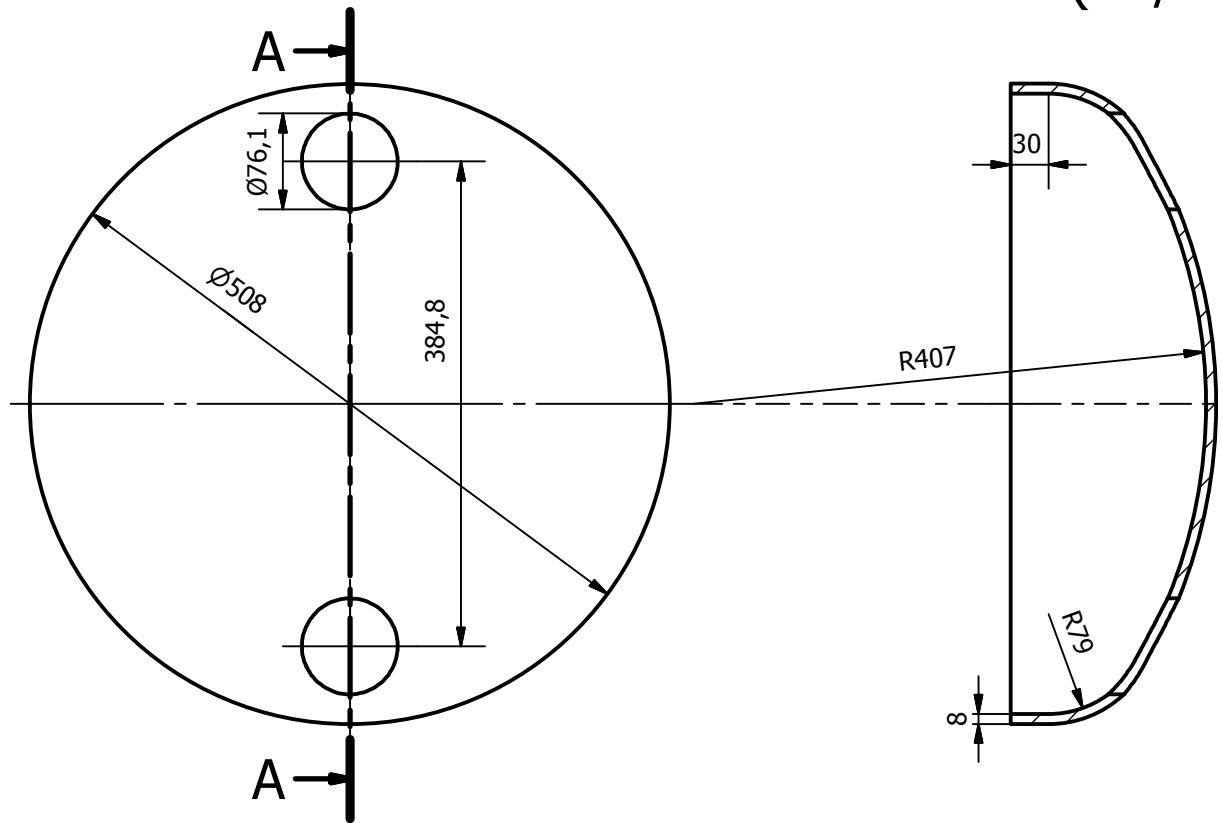


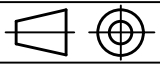




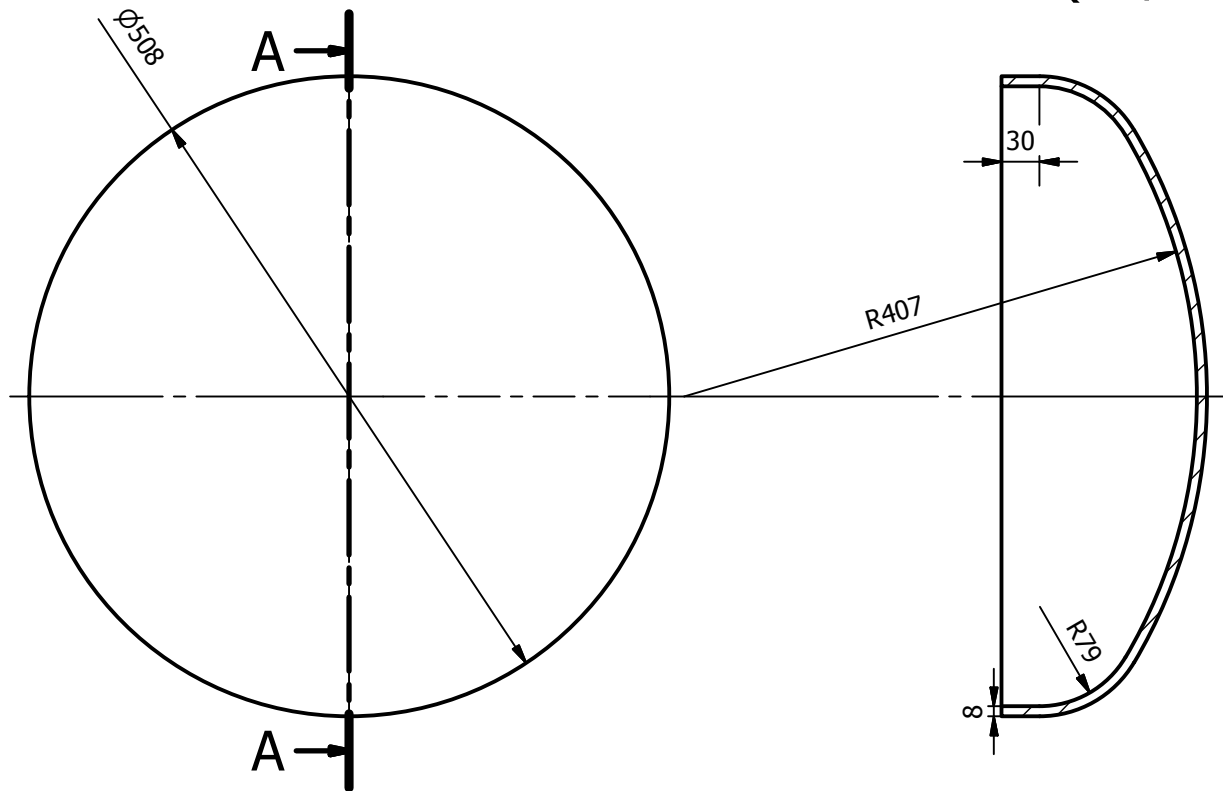
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	14.01.2014.	J. Ladika		
Razradio	14.01.2014.	J. Ladika		
Crtao	14.01.2014.	J. Ladika		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				
Materijal:		Masa:	DIPLOMSKI RAD	
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo originala		CIJEVNA STIJENKA		Format: A4
1:6		Crtež broj: 2		Listova:
				List:


A-A ( 1 / 6 )

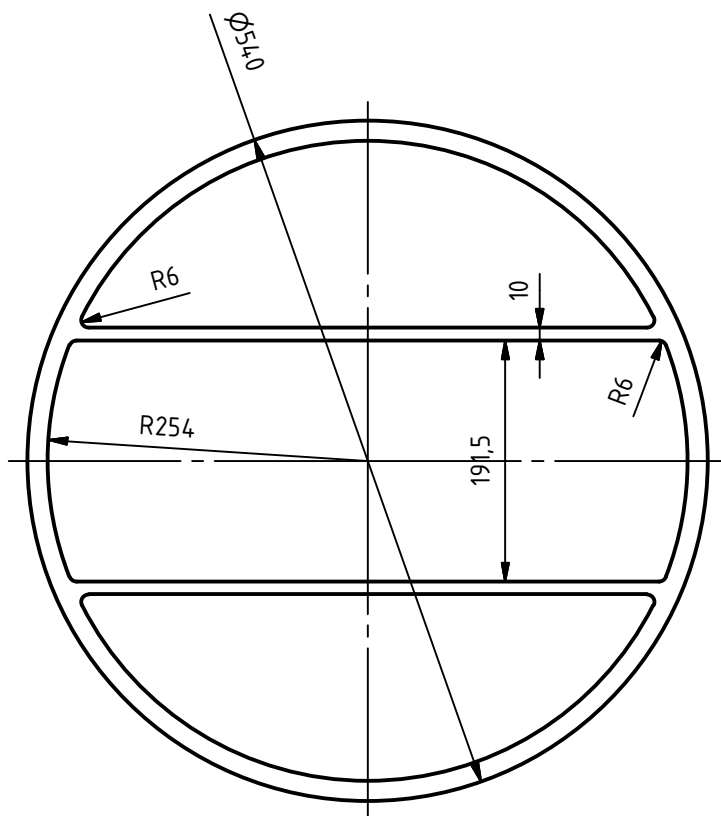



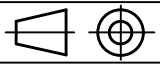
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	14.01.2014.	J. Ladika		
Razradio	14.01.2014.	J. Ladika		
Crtao	14.01.2014.	J. Ladika		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				
Materijal:		Masa:	DIPLOMSKI RAD	
 Mjerilo originala		Naziv:		Pozicija:
<b>1 : 6</b>		<b>LIJEVA PODNICA</b>		Format: <b>A4</b>
		Crtež broj: <b>3</b>		Listova:
				List:

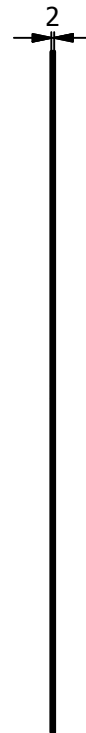
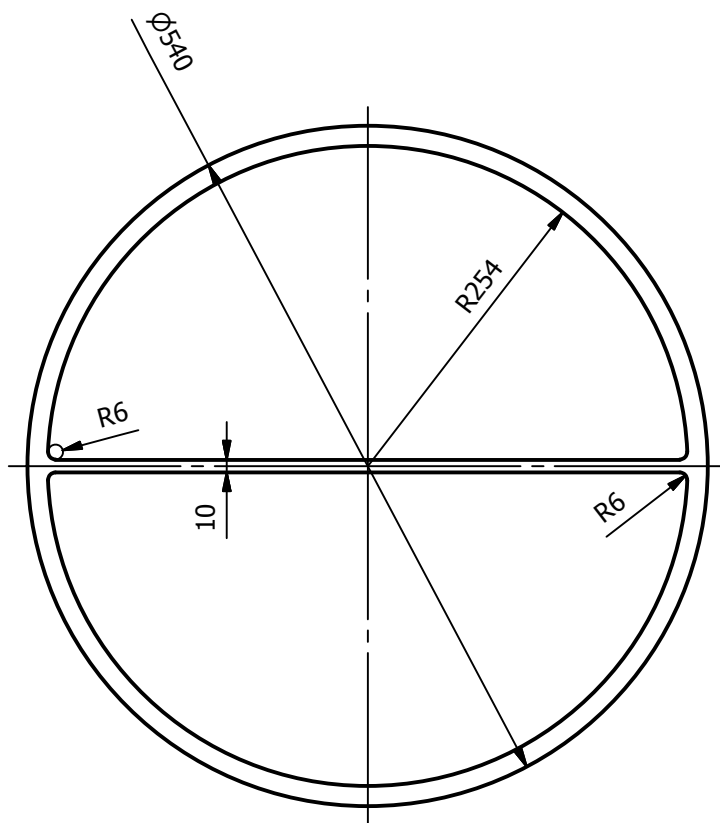
A-A ( 1 / 6 )


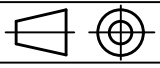


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	14.01.2014.	J. Ladika		
Razradio	14.01.2014.	J. Ladika		
Crtao	14.01.2014.	J. Ladika		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:	DIPLOMSKI RAD	
 Naziv:		DESNA PODNICA		Pozicija:
Mjerilo originala <b>1 : 6</b>		Crtež broj: 4		Format: <b>A4</b>
				Listova:
				List:



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	14.01.2014.	J. Ladika		
Razradio	14.01.2014.	J. Ladika		
Crtao	14.01.2014.	J. Ladika		
Pregledao				
Objekt:		Objekt broj:		
		R. N. broj:		
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:	DIPLOMSKI RAD	
 Naziv:		LIJEVA BRTVA		Pozicija:
Mjerilo originala 1:6		Crtež broj: 5		Format: A4 Listova:
				List:



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	14.01.2014.	J. Ladika		
Razradio	14.01.2014.	J. Ladika		
Crtao	14.01.2014.	J. Ladika		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:	DIPLOMSKI RAD	
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo originala		DESNA BRTVA		Format: <b>A4</b>
1:6		Crtež broj: 6		Listova:
				List: